

УДК 535.015

ВЫСОКОСТАБИЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ВОЛОКОННАЯ ЛИНИЯ ДЛИНОЙ 940 КМ МЕЖДУ ИНСТИТУТАМИ МРQ И РТВ ДЛЯ ЗАДАЧ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

Г.А. Вишнякова¹, К.С. Кудеяров¹, К.Ю. Хабарова^{1,2}, Н.Н. Колачевский^{1,3}

¹ФГБУН Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва,

²ФГУП «ВНИИФТРИ»

³Российский квантовый центр, Территория Инновационного центра «Сколково», Москва
gulnarav7@gmail.com

Относительная нестабильность атомных оптических 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 относительных нестабильности и неточности передачи частот оптических сигналов лучше 10^{-18} за время усреднения менее 2000 с при передаче на расстояние порядка 1000 км, что говорит о применимости таких линий для задач релятивистской геодезии с сантиметровым разрешением. В статье описана новая линия РТВ-МРQ и ее применение для сличения оптических часов.

Ключевые слова: передача ультрастабильных сигналов частоты, оптоволоконные линии связи, фемтосекундный лазер, стабилизация частоты

HIGH STABILITY OPTICAL FIBER 940 KM LINE BETWEEN MPQ AND PTB INSTITUTES FOR TASKS RELATIVISTIC GEODESY

G.A. Vishnyakova¹, K.S. Kudeyarov¹, K.Yu. Khabarova^{1,2},
N.N. Kolachevsky^{1,3}

¹P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,

²FSUE «VNIIFTRI»

³Russian Quantum Center, Innovation Center Territory «Skolkovo», Moscow
gulnarav7@gmail.com

Today, the fractional instability of atomic optical clocks has reached the record eighteen-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 2000 s for a 1000 km optical link that allows for chronometric levelling experiments at and below the cm-level. The new PTB-MPQ fiber link and its application for optical clock comparison are described.

Key words: ultrastable frequency transfer, optical fiber links, femtosecond laser, frequency stabilization

Введение

Формирование точных сигналов частоты и времени является одной из важнейших задач современной науки [1]. Повсеместно используемые технологии в области навигации, геодезических измерений, глобальных коммуникационных сетей или высокоскоростных каналов передачи данных основываются на высокоточных сигналах времени и частоты. Также можно перечислить глобальную космическую навигацию, интерферометрию со сверхдлинной базой, измерение фундаментальных констант, разработку новых стандартов физических величин для метрологии, а также тесты фундаментальных физических теорий.

Развитие метрологии частот оптического диапазона (10^{14} – 10^{15} Гц) было стимулировано созданием фемтосекундного синтезатора оптических частот [2]. Прогресс методов лазерного охлаждения, лазерной стабилизации и измерения оптических частот привел к созданию оптических часов на ансамблях холодных атомов и одиночных ионах, относительная нестабильность которых достигла порядка 10^{-18} при времени усреднения 1000 с [3,4,5]. Стабильность и воспроизводимость частоты оптических часов превысила характеристики лучших микроволновых стандартов (цезиевых фонтанов) на два порядка, что вывело оптические часы на лидирующие позиции. В России это направление также активно развивается [6,7,8].

Одной из проблем, ограничивающих широкое практическое использование высокоточных оптических стандартов частоты, является сложность их транспортировки, сличения и распространения сигналов частоты и времени без снижения 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)) [9], которая обеспечивает относительную нестабильность передачи на уровне 10^{-15} за одни сутки. Этого достаточно для сличения большинства часов микроволнового диапазона, однако совершенно не удовлетворяет новым требованиям, предъявляемым оптическими стандартами частоты (см. рис. 1). Так, например, одним из новых направлений применения оптических часов являются задачи гравиметрии [10], опирающиеся на измерение гравитационного смещения частоты. Это направление называется релятивистская геодезия. 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 тысяч километров.

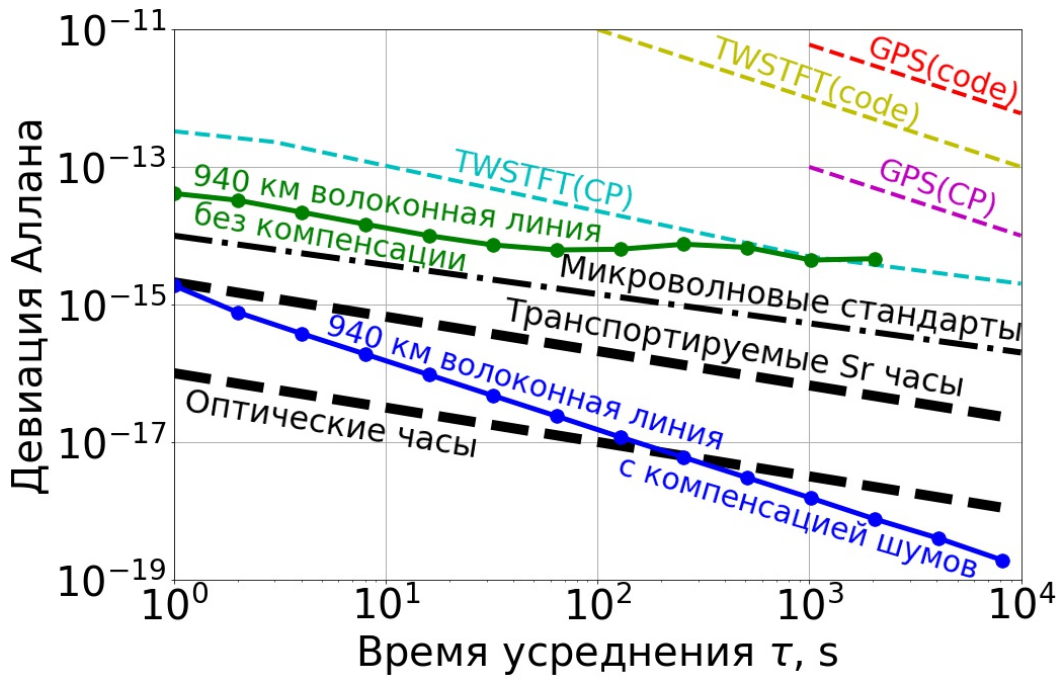


Рис. 1. Относительная нестабильность передачи сигналов частоты радиочастотными методами с передачей фазы несущей (дуплекс TWSTFT(CP) и ГНСС (Global Positioning System) GPS(CP)), с применением псевдослучайного кода (TWSTFT(code) и GPS(code)) и с передачей фазы оптической несущей по оптоволоконной линии с и без компенсации шумов по сравнению с относительной нестабильностью частоты лучших микроволновых и оптических стандартов и транспортируемых оптических часов

В настоящее время обсуждается возможность создания Системы глобальных геодезических наблюдений (GGOS) [11], 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 GGOS является наличие общего опорного уровня высоты, не подверженного приливным, геологическим и атмосферным изменениям. Это означает, что необходимы одни опорные атомные часы, чья частота определяет нулевой уровень гравитационного потенциала. Например, такими часами могли бы быть часы, размещенные на орбите. Тогда сеть наземных оптических часов – транспортируемых или связанных оптическими волокнами – с неопределенностью порядка 10^{-18} могла бы связать и синхронизовать геодезические лаборатории по всему миру. Для решения этих задач уже сегодня формируется сеть атомных часов (см. рис. 2, адаптированный из [12]), включая оптические, с использованием различных кана-

лов синхронизации, в том числе оптоволоконных линий связи [12, 13, 14]. Европейский проект носит название International Timescales with Optical Clocks (ИТОС) [15].

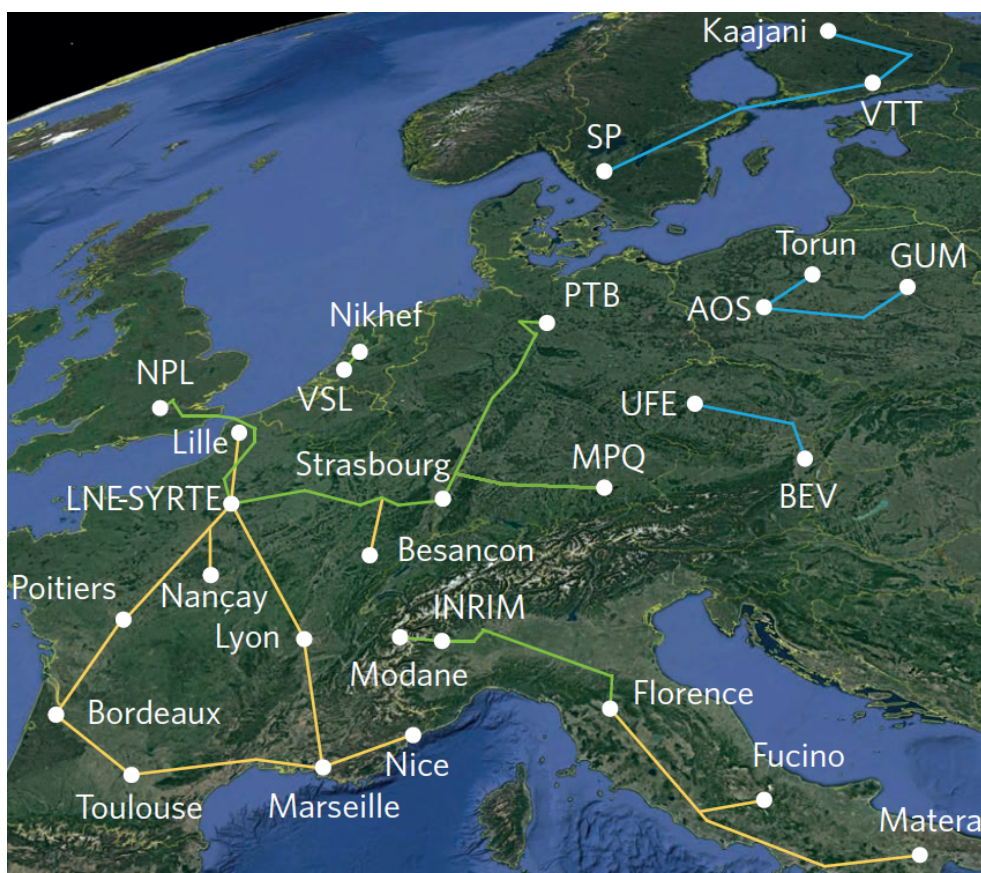


Рис. 2. Адаптирован из [12]. Оптоволоконные линии Европы для передачи времени (синие) и частоты (зеленые – запущенные, желтые – находящиеся на стадии обсуждения). Возможно, некоторые из обсуждаемых линий уже введены в эксплуатацию и указаны не все существующие линии. AOS, Astrogeodynamic Observatory, Боровец/Познань, Польша; BEV, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Вена, Австрия; GUM, Główny Urząd Miar, Central Office of Measures, Варшава, Польша; INRIM, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Турин, Италия; LNE-SYRTE, Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, Système de Références Temps-Espace, Париж, Франция; MPQ, Max Planck Institute for Quantum Optics Гархинг/Мюнхен, Германия; NPL, National Physical Laboratory, Теддингтон, Англия; Nikhef, National Institute for Nuclear and High-Energy Physics, Амстердам, Нидерланды; PTB, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Брауншвайг, Германия; SP, Technical Research Institute of Sweden, Бурос, Швеция; UFE, Institute of Photonics and Electronics of the Czech Academy of Science, Прага, Чехия; VSL, Dutch National Metrology Institute, Делфт, Нидерланды; VTT, VTT-MIKES Metrology, Эспо, Финляндия

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 при передаче информации используется не радиочастотная модуляция светового поля, а фаза его несущей. Требуется использование высокотехнологичных подходов: существенное повышение степени монохроматичности излучения лазеров телекоммуникационного диапазона [16,17,18], использование фемтосекундных синтезаторов оптических частот [2], а также специфических систем обратной связи, компенсирующих шумы канала [19–23].

Использование выделенных (т.н. «темных») линий оптоволоконной связи оказывается не всегда возможно ввиду их высокой стоимости. Существующие интернет-линии оптоволоконной связи являются широкодоступным и распространенным видом коммуникаций в оптическом диапазоне, однако непосредственный перенос технологии оказывается затруднен из-за наличия в них оптических маршрутизаторов и повторителей, не сохраняющих 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 [24]. Уже сегодня в мире существуют оптоволоконные линии, соединяющие лаборатории в различных городах, а иногда даже странах, которые используются для передачи ультрастабильных сигналов частоты. Также ведутся работы по созданию открытого канала передачи сигналов частоты через спутники [12]. В основе метода передачи сигналов времени и частоты по открытым каналам лежат те же принципы, что и при передаче сигналов по оптоволоконным линиям связи.

Высокостабильные 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.

В разделах 2 и 3 описывается принцип передачи точных и стабильных сигналов частоты по оптическим волокнам. В разделе 4 рассматривается возможность применения для этих целей интернет-каналов общего пользования. В разделах 5 и 6 описывается новая линия, соединяющая институты МРQ и РТВ в Германии, и ее применение для сличения оптических часов.

Передача сигналов частоты

Для передачи 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 $10^{-16}/\sqrt{\tau}$ [3,4,5,25], и транспортируемые оптические часы с нестабильностью на уровне $2 \cdot 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ [13], где τ – время усреднения, а в области телекоммуникаций проведены впечатляющие работы по исследованию оптических волокон. Оптические волокна являются наилучшей средой для передачи оптических сигналов на большие расстояния из-за своей гибкости, отличных шумовых характеристик и слабого затухания в них оптического сигнала (0,23 дБ/км для излучения с длиной волны 1550 нм). Обратное бриллюэновское рассеяние в оптических волокнах не позволяет повысить мощность передаваемого сигнала - максимальная мощность излучения на входе в оптическое волокно оказывается ограничена величиной около 5 мВт [26–29]. Низкое затухание позволяет доставлять сигналы без дополнительного усиления на расстояния до 100 км. Однако если необходимо передать сигнал на расстояние, намного превышающее 100 км, требуется использовать промежуточные усилители, сохраняющие фазу сигнала.

Для промежуточного усиления сигнала используются различные методы. Одним из самых распространенных является использование легированных эрбием волоконных усилителей (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA), в которых усиление сигнала происходит в активной части волокна, что дает усиление до 10 дБ в широкой области спектра 1530-1580 нм. Ограничение усиления связано с рэлеевским рассеянием и насыщением активной среды усилителя [26], поэтому при больших расстояниях между передатчиком и приемником необходимо использовать каскад усилителей, отстоящих друг от друга на расстояние не более 100-120 км. Кроме того, большое количество усилителей в каскаде регулярно создает события проскальзывания фазы (cycle-slip), нарушая когерентность сигнала.

Другим типом усилителей являются специально разработанные бриллюэновские усилители (Fiber Brillouin Amplifier, FBA) с использованием дополнительного лазера [26]. Они позволяют получать усиление до 45 дБ, могут располагаться реже – примерно каждые 200 км – и практически не инициируют события проскальзывания фазы. Полоса усиления составляет около 20 МГц, поэтому необходима стабилизация частоты лазерного излучения, процесс усиления также чувствителен к поляризации, что делает их использование чрезвычайно трудным, однако имеющиеся преимущества обусловили их популярность.

Несмотря на то, что излучение, проходящее по оптоволокну, испытывает значительно меньше возмущений, нежели излучение, распространяющееся свободно [30], волокно вносит свои фазовые возмущения. Наиболее значительными возмущениями являются флуктуации температуры и акустические вибрации. Они приводят к изменению оптической длины волокна и флук-

туациям показателя преломления. Это вызывает фазовые сдвиги, которые часто называют доплеровскими шумами.

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

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

Для плавленого кварца термооптический коэффициент $dn/dT \approx 1 \cdot 10^{-5}$ 1/К, а коэффициент теплового расширения $1/L \cdot dL/dT \approx 6 \cdot 10^{-7}$ м/К [31]. Таким образом, сигнал с частотой ν_0 и вакуумной длиной волны λ_0 будет испытывать относительный сдвиг частоты

$$\frac{\Delta\nu(t)}{\nu_0} = \frac{1}{\nu_0 \lambda_0} \frac{d(nL)}{dt}.$$

Например, если обыкновенное одномодовое волокно ($n = 1,468$) длиной 1000 км испытывает изменение температуры на один градус в течение одного дня, то сигнал на длине волны 1542 нм приобретет относительный сдвиг частоты $4 \cdot 10^{-13}$, что соответствует почти 80 Гц.

Акустические волны, действующие на оптоволокно, могут вызывать напряжения за счет изменения давления P , что тоже приводит к флуктуациям фазы передаваемого сигнала. Также, как и в случае флуктуаций температуры, изменение давления приводит к флуктуациям длины оптического пути:

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

Коэффициенты dn/dP и $1/L \cdot dL/dP$ известны и составляют $5 \cdot 10^{-11}$ 1/Па и $1 \cdot 10^{-11}$ 1/Па соответственно [32]. Изменение давления в 0,01 Па вызывает относительный сдвиг частоты сигнала на длине волны 1542 нм для волокна длиной 1000 км до $1,5 \cdot 10^{-14}$ или 3 Гц. Следует, однако, отметить, что в обоих случаях - при флуктуациях температуры и фазы - сдвиг частоты можно скорректировать при помощи петли обратной связи, которая будет описана ниже.

Схема компенсации шумов

В данном 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 землей, относительные сдвиги частоты за счет колебаний температуры и давления могут составлять несколько единиц четырнадцатого знака, как было показано выше.

Регистрация фазовых шумов, как правило, осуществляется при помощи интерферометра Майкельсона, одно плечо которого собирается на стороне

отправителя, как показано на рис. 3 [23]. Излучение передающего лазера расщепляется на две части. Одна часть остается на стороне отправителя, направляясь по короткому плечу интерферометра, свободному от фазовых искажений, и является опорной. Вторая часть направляется в длинное плечо интерферометра, содержащее оптоволоконную линию передачи. На стороне отправителя перед оптоволоконным располагается активный фазовый элемент, например, акусто-оптический модулятор (АОМ). На выходе из волокна на стороне удаленного пользователя находится фарадеевское зеркало, которое отражает часть переданного света назад и поворачивает поляризацию отраженного сигнала на 90° . 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 остается постоянной [33]. Автогетеродинный радиочастотный сигнал биений, содержащий накопленные фазовые сдвиги $\Phi_{\text{fiber}}(z, t)$, внесенные линией, регистрируется фотодетектором на стороне отправителя. Сигнал с фотодиода смешивается на фазовом детекторе с сигналом с опорного генератора. Фазовый детектор преобразует флуктуации фазы в напряжение, которое используется для формирования сигнала ошибки в петле обратной связи для управления частотой АОМа, что позволяет компенсировать фазовые искажения в полосе частот петли обратной связи, которая определяется временем прохождения сигнала в прямом и обратном направлении [34].

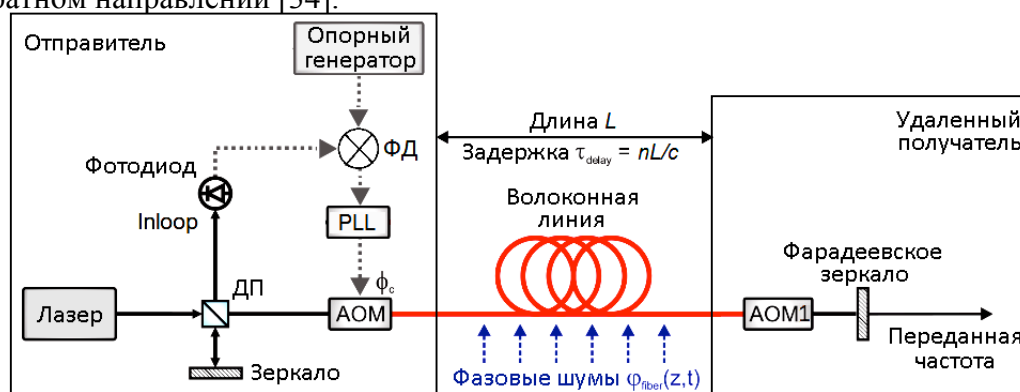


Рис. 3. Упрощенная схема передачи сигнала и компенсации фазовых шумов, вносимых оптоволоконной линией. Сигнал, проходящий по оптоволоконной линии длиной L , испытывает временную задержку τ . ДП – делитель пучка, АОМ – акусто-оптический модулятор, ФД – фазовый детектор, PLL – петля обратной связи фазовой автоподстройки частоты

Перед фарадеевским зеркалом устанавливается еще один АОМ (на рис. 3 обозначен как АОМ1), работающий на фиксированной частоте. Его наличие необходимо для того, чтобы уникальным образом выделить сигнал, отра-

женный от фарадеевского зеркала на фоне других отражений, возникающих в длинных линиях (например, на входе усилителей или местах сварки оптоволокон). Тогда выполняется соотношение $f_0 = 2(f_{\text{АОМ}}(t) + \Delta f_{\text{fiber}}(t) + f_{\text{АОМ1}}(t))$, где f_0 – регистрируемый сигнал биений, $f_{\text{АОМ}}$ – частота АОМ-а компенсации, Δf_{fiber} – флуктуации частоты в волокне, $f_{\text{АОМ1}}$ – частота АОМ1.

Фундаментальное ограничение на достижимое значение подавления фазовых шумов возникает из-за конечности скорости света в оптоволокне, поскольку шумы могут быть обнаружены только после того, как свет пройдет по всей линии дважды. Таким образом, фазовые шумы с высокими частотами не подавляются. К тому же свет попадает к удаленному пользователю до того, как происходят корректировки, поэтому подавить полностью шумы сигнала после прохождения линии в одном направлении нельзя. Также любое различие шумов в прямом и обратном направлении приводит к неидеальной компенсации на принимающей стороне. Эти ограничения начинают играть роль при передаче сигналов на расстояния более 100 км.

Следует отметить, что для эффективного подавления шумов линии методом автогетеродинамирования необходимо, чтобы на сигнал биений не влияли шумы самого передающего лазера. Длина когерентности L_c лазера является функцией его спектра: $L_c = \frac{c}{\pi \Delta \nu} = c \tau_c$, где $\Delta \nu$ – спектральная ширина линии лазера, c – скорость света в волокне, а τ_c – время когерентности. В случае, если длина когерентности лазера меньше длины линии, 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, что делает компенсацию некорректной. Поэтому передающий лазер должен обладать узкой спектральной линией менее 1 Гц, что соответствует длине когерентности $\sim 10^5$ км. В этом случае информация, полученная методом автогетеродинамирования, может быть уверенно использована для компенсации фазовых шумов, вносимых волокном.

Передача сигналов частоты по интернет-каналам

Использование выделенной «темной» оптоволоконной линии, по которой идет передача только одного сигнала, не всегда возможно, так как стоимость аренды таких линий весьма высока. В свою очередь одна линия сети Интернет разбивается на множество частотных каналов, отличающихся частотой несущей, что позволяет передавать информацию гораздо эффективнее и снижает стоимость. Учитывая повсеместную распространенность линий для передачи интернет-трафика, было бы разумно использовать их для передачи стабильных сигналов времени и частоты. Однако на пути к реализации этого решения существуют определенные трудности.

В отличие от аналоговой схемы на основе усилителей EDFA или FBA, в Интернет-каналах используется другой принцип: 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, передаваемых по линии, усилить при помощи двупроходного усилителя, сохраняющего фазу, и завести обратно в линию для дальнейшего распространения. Таковую же процедуру необходимо повторить для сигнала, распространяющегося в обратном направлении (рис. 4).

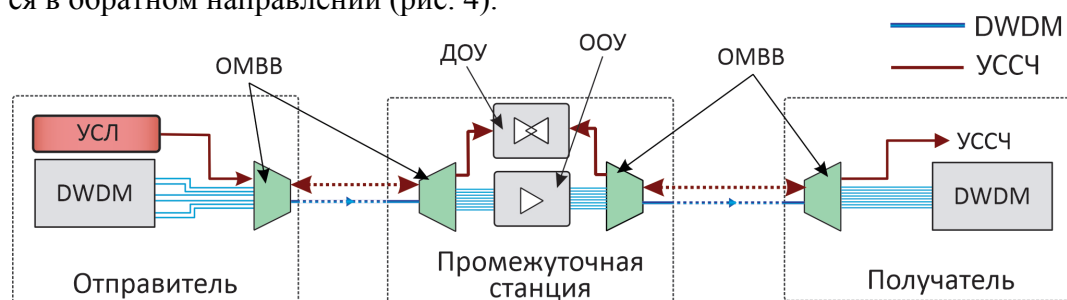


Рис. 4. Схема передачи сигнала частоты с использованием интернет-каналов. Расстояние между промежуточными станциями менее 50 км. УСЛ – ультрастабильный лазер, DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – поток данных в линии, распространяющийся по технологии спектрального уплотнения каналов, OMBB (OADM – Optical Add Drop Multiplexer) – оптический мультиплексор для ввода и вывода сигнала, ДОУ – двунаправленный оптический усилитель, ООУ – однонаправленный оптический усилитель, УССЧ – ультрастабильный сигнал частоты

В общественных интернет-сетях средние потери мощности достигают 0,29 дБ/км, что почти в полтора раза больше, чем потери в «темной» линии. В основном потери увеличиваются за счет наличия в линии большого количества волоконных разъемов с плоской поверхностью (стандарт PC), на которых происходит частичное отражение света. Из-за этих эффектов эрбиевые двупроходные усилители не могут работать на достаточном уровне усиления, поскольку превышение порога приводит к их самовозбуждению. Таким образом, с использованием только эрбиевых усилителей невозможно полностью компенсировать ослабление сигнала, если узлы линии расположены на расстоянии более 50 км. Возможным решением является комбинация EDFA и FBA.

Для преодоления этого ограничения может быть использована каскадная линия передачи: линия, разделенная на несколько отрезков, между которыми находятся промежуточные лазерные станции-повторители [24, 35]. Эти

удаленные промежуточные станции являются наиболее сложным элементом линии, поскольку они должны работать автономно. В этом случае каждая промежуточная станция представляет собой отдельную лазерную систему со спектрально узкой линией излучения, фаза которого привязана к фазе поступающего на нее сигнала, пришедшего 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 распространения по линии 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 служить источником стабильного сигнала частоты, если его излучение направить на ответвитель, по которому сигнал будет доставлен пользователю по дополнительной короткой стабилизированной линии. Стоит отметить, что разделение линии на части соответственно увеличивает ширину полосы обратной связи компенсации шумов, так как длина стабилизируемого участка уменьшается.

Удаленная станция управляется встроенным компьютером, который управляет микроконтроллерами и доступен по Интернет-протоколу. Это дает возможность удаленно оптимизировать процесс передачи сигнала. Кроме того, необходимо удаленно контролировать сигналы ошибки петель обратной связи систем компенсации фазовых шумов, чтобы оптимизировать усиление и избегать 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 маршруту лаборатория LPL (Вильтанёз, северный пригород Парижа) – Нанси (восток Франции) – лаборатория LPL, длина которого составляет 1100 км. Линия была разбита на четыре отрезка, были использованы 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 с передачей того же сигнала по короткой лабораторной линии. Относительная нестабильность передачи оптического сигнала частоты по такой линии достигла $4 \cdot 10^{-16}$ за одну секунду усреднения и $5 \cdot 10^{-20}$ за 60000 с усреднения [24].

Линия РТВ-МРQ

Оптоволоконная линия длиной 940 км, соединяющая Метрологический институт в г. Брауншвейг (РТВ) с Институтом квантовой оптики общества Макса Планка в г. Гархинг (МРQ) (см. рис. 5), проложена вдоль газового трубопровода компании Газлайн, проходящего под землей. Для проведения эксперимента использовалась «темная» линия, не используемая для передачи интернет-трафика. В эксперименте также использовалось второе «темное» оптоволокно, расположенное вместе с первым, для создания антипараллельной конфигурации и исследования линии длиной 1880 км, о которых будет сказано ниже.



Рис. 5. Схематичное изображение оптоволоконной линии РТВ-МРQ. Желтые маркеры обозначают расположение усилителей

В качестве рабочей выбрана длина волны излучения 1542,14 нм (194,4 ТГц), соответствующая используемой в экспериментах по передаче частоты между институтами РТВ и SYRTE (г. Париж) [36]. Для увеличения длины

когерентности излучения передающего лазера его частота была стабилизирована методом Паунда-Дривера-Холла по ультрастабильным высокодобротным резонаторам Фабри-Перо из стекла марки ULE и монокристаллического кремния в лабораториях МРQ и РТВ, соответственно (см. рис. 6). Для компенсации затухания в линии, которое составляет более 220 дБ, используются усилители двух типов, расположенные через каждые 150-200 км: 4 волоконных Бриллюэновских усилителя и 1 эрбиевый волоконный усилитель на ближайшей к МРQ станции. Управление Бриллюэновскими усилителями осуществляется удаленно из лаборатории РТВ, эрбиевым усилителем – из лаборатории МРQ. В обеих лабораториях также находились усилители обоих типов. Полученная ширина полосы петли обратной связи ограничена длиной волокна и составляет около 50 Гц. Из ряда возможных схем эксперимента была выбрана концепция лазерного повторителя (Repeater Laser Station): частота излучения передающего лазера в МРQ дополнительно стабилизируется с помощью акусто-оптического модулятора по частоте излучения, доставленного из РТВ по волокну 1 с активированной системой подавления шумов. Далее по (также стабилизированному) волокну 2 это излучение доставляется обратно в РТВ, формируя т.н. антипараллельную конфигурацию. Таким образом, на обоих концах линии детектируется по два сигнала биений: используемый для стабилизации волокна (т.н. inloop) и полученный сбиванием локального лазерного излучения с доставленным по соответствующему другому волокну (т.н. remote), что даёт полную информацию о стабильности и точности линии. Такая методика позволяет быстро обнаруживать и устранять возникающие в оптоволоконной линии проблемы, обеспечивает надёжную работу всей линии в целом и понижает требования к стабильности привязки лазера в МРQ к ULE резонатору (в частности, компенсирует его дрейф) и другим температурным и акустическим шумам в лаборатории.

Измерение частот биений осуществляется с помощью счетчика частоты высокого разрешения без мертвого времени K+K Messtechnik в Δ -режиме (режим усреднения фазы). Система компенсации фазовых шумов позволяет уменьшить вклад в относительную нестабильность передаваемого сигнала более чем на порядок (с $4 \cdot 10^{-14}$ до $2 \cdot 10^{-15}$) на времени усреднения 1 с и на четыре порядка (с $4 \cdot 10^{-15}$ до $4 \cdot 10^{-19}$) на времени усреднения 4000 с в терминах девиации Аллана по сравнению с передачей по волокну без системы компенсации (см. рис. 1). Для определения характера остаточных шумов была также исследована зависимость модифицированной девиации Аллана от времени, которая свидетельствует о том, что шумы носят характер белого шума фазы и шумов более высокого порядка [23]. Вклад в неточность передаваемого сигнала определяется отклонением среднего значения частоты от номинального и не превышает $1.3 \cdot 10^{-19}$ после 4000 с усреднения. Таким

образом, стабилизированная волоконная линия может быть использована для измерения разности геопотенциалов с помощью оптических стандартов частоты или для сличения таких стандартов, не внося определяющий вклад в нестабильность и неточность.

Помимо описанной антипараллельной конфигурации была исследована линия длиной 1880 км, сформированная путем соединения двух волокон в лаборатории МРQ между собой. Таким образом, компенсация шумов всей линии рекордной длины осуществлялась из лаборатории РТВ. Относительные нестабильность и неточность оказались примерно в 2-3 раза больше [37], однако все еще не определяющими для экспериментов по сличению оптических часов.

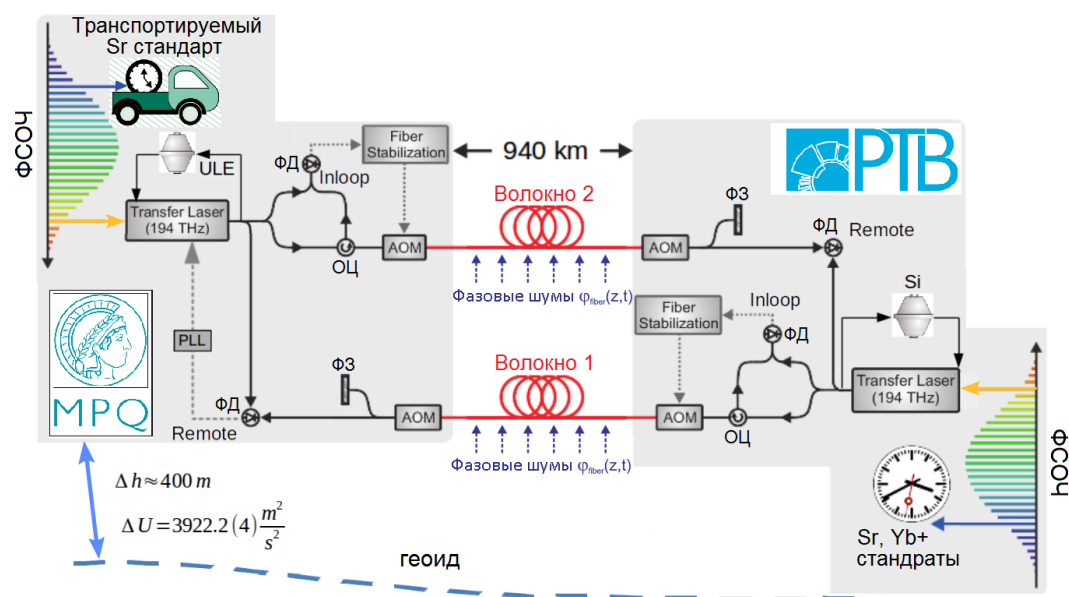


Рис. 6. Схема сличения атомных оптических стандартов частоты по стабилизированной волоконной линии. ULE, Si – ультрастабильные высокочастотные резонаторы, АОМ – акустооптический модулятор, PLL – петля обратной связи фазовой автоподстройки частоты, ФЗ – фарадеевское зеркало, ОЦ – оптический циркулятор, ФД – фотодиод, ФСОЧ – фемтосекундный синтезатор оптической частоты

Измерительная кампания по сличению оптических стандартов частоты

В соответствии с общей теорией относительности, часы, расположенные поблизости от массивных объектов, идут медленнее, нежели вдали от них. Этот эффект носит название гравитационного замедления времени (ГЗВ) и подчиняется закону:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta U}{c^2}.$$

И хотя в масштабах длин 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 экспериментального наблюдения ГЗВ и измерения непосредственно изменения гравитационного потенциала при перемещении из одной точки на поверхности Земли в другую [15]. Вблизи поверхности Земли величина эффекта составляет 10^{-16} 1/м в относительных единицах.

В большинстве сегодняшних экспериментов и приложений гравитационные поправки вычисляются на основе измерений разности высот, выполненных классическими геодезическими методами (нивелирование и дальнометрия) [35]. Однако появление оптических часов позволяет «обратить» задачу и использовать точные измерения частоты для вычисления разности высот (метод релятивистской геодезии). Лучшие на сегодняшний день оптические часы демонстрируют относительную неточность несколько единиц 18-го знака [39], что эквивалентно разнице высот несколько сантиметров, то есть на уровне точности методов нивелирования. Первые эксперименты со стационарными часами в этом направлении выполнены группами Д. Вайнланда [10] и Х. Каттори [40].

Помимо стационарных, в мире активно ведется разработка транспортируемых стандартов частоты. Так, в РТВ созданы возимые часы на атомах стронция [13], а в WIPM CAS, Китай, – на ионе кальция [14]. В 2016 году командой из РТВ была осуществлена первая выездная измерительная кампания в Италии [41]. Неточность транспортируемого стандарта составляет несколько единиц 17-го знака, что позволяет определять разность высот с точностью нескольких десятков см. Так как эта точность пока отстает от точности, обеспечиваемой методом нивелирования, эксперимент скорее носит статус сличения стандартов, а не измерения разности потенциалов. В 2017 году возимые часы, созданные в РТВ, были доставлены в Париж для проведения второй кампании, а в 2018 – в Гархинг [42] для сличения часов с использованием оптоволоконной линии РТВ-МРQ, описанной в предыдущем параграфе. Отличительной особенностью данной кампании является отсутствие стационарного оптического стандарта частоты в МРQ, который значительно облегчает отладку возимого стандарта после транспортировки. Разность высот между городами Гархинг и Брауншвайг составляет около 400 м, а разность потенциалов измерена с погрешностью 10^{-4} методом нивелирования и составляет $3922,2(4) \text{ м}^2/\text{с}^2$, что соответствует относительному сдвигу частоты порядка $4 \cdot 10^{-14}$.

Схема эксперимента показана на рис. 6. В измерении были задействованы стационарные оптические часы на атомах стронция и на ионе иттербия, расположенные в институте РТВ. Использование фемтосекундных гребенок (фемтосекундных синтезаторов оптической частоты, ФСОЧ) и блоков удвоения частоты позволяет сличать между собой излучение на различных длинах волн: 698 нм, соответствующее часовому переходу в атоме стронция, 435 нм в часах на ионе иттербия и 1542 нм для передающего лазера оптоволоконной линии. ФСОЧ также позволяет связать между собой оптический и радиочастотный диапазоны. Была выбрана следующая конфигурация эксперимента. В лаборатории МРQ соответствующая спектральная компонента ФСОЧ привязывалась по фазе к излучению часового лазера транспортируемого стандарта на длине волны 698 нм, которое периодически (раз в несколько секунд) подстраивалось по часовому переходу. Излучение передающего лазера, как уже было сказано, стабилизировалось по частоте излучения, доставленного из РТВ, которое, в свою очередь, стабилизировалось по кремниевому криогенному резонатору. На стороне РТВ ФСОЧ стабилизировалась по радиочастотному сигналу от водородного лазера, а соответствующие спектральные компоненты формировали сигналы биений с передающим лазером и двумя часовыми лазерами. Соответствующая линейная комбинация сигналов биений напрямую дает информацию о гравитационном сдвиге частоты.

Было получено около 35 часов полезных данных. Данные находятся в обработке.

Заключение

В статье описаны метод передачи ультрастабильных сигналов частоты по оптоволоконным линиям связи, новая линия, соединяющая институты РТВ и МРQ, и эксперимент по сличению оптических стандартов частоты. Современные оптические стандарты частоты, обладающие выдающейся 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 тысячи км. Открываются новые возможности использования оптических стандартов частоты для решения прикладных и фундаментальных задач, таких как картографирование гравитационного потенциала Земли. Учитывая повсеместную распространенность волоконно-оптических линий связи, можно ожидать, что метод передачи точных сигналов времени и частоты по ним в скором времени будет использоваться наравне со спутниковыми методами, дополняя и расширяя их возможности.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ-DFG 17-52-12016 и НА 1457/12-1.

Литература

1. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. – М.: Физматлит, 2009; Riehle F. Frequency Standards. Basics and Applications – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2004.
2. Udem Th., Holzwarth R., Haensch T. W. // Nature, 2002, 416, 233.
3. Hinkley N. et.al. // Science, 2013, 341, 6151 1215.
4. Bloom B. J. et.al. // Nature, 2014, 506, 71.
5. Brewer S. M. // Phys. Rev. Lett., 2019, 123, 033201.
6. Golovizin A., Fedorova E., Tregubov D. et al. // Nat. Commun., 2019, 10, 1724.
7. Semerikov I. A. et.al. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2018, 45, 11, 337.
8. Sutyurin D. V., Berdasov O. I., Antropov S. Yu. et al. // Quantum Electron., 2019, 49, 199.
9. Bauch A. et.al. // Metrologia, 2006, 43, 109.
10. Chou C. W., et.al. // Science, 2010, 329, 1630.
11. Boucher C., Pearlman M., Sarti P. // Advances in Space Research, 2015, 55, 1, 24.
12. Riehle F. // Nature Photonics, 2017, 11, 25.
13. Koller S. B. et.al. // Phys. Rev. Lett., 2017, 118, 073601.
14. Cao J. et.al. // Applied Physics B, 2017, 123, 112.
15. <http://projects.npl.co.uk/itoc/project-structure/reg/gravity-potential/>
16. Swierad D. et.al. // Scientific Report, 2016, 6, 33973.
17. Alnis J. et.al. // Phys. Rev. A, 2008, 77, 053809.
18. Wu L. et.al. // Scientific Report, 2016, 6, 24969.
19. Jiang H. et.al. // J. Opt. Soc. Am. B, 2008, 25, 2029.
20. Williams P. A., Swann W. C., Newbury N. R. // J. Opt. Soc. Am. B, 2008, 25, 1284.
21. Grosche G. et.al. // Opt. Lett., 2009, 34, 2270.
22. Predehl K. et.al. // Science, 2012, 336, 441.
23. Droste S. et.al. // Phys. Rev. Lett., 2013, 111, 110801.
24. Chiodo N. et.al. // Optics Express, 2015, 23, 26 33927.
25. Ludlow A. et.al. // Rev. Mod. Phys., 2015, 87, 638.
26. Terra O., Grosche G., Schnatz H. // Opt. Express., 2010, 18, 15 16102.
27. Brillouin L. // Annales des Physique, 1922, 17, 88.
28. Ippen E. P., Stolen R. H. // Appl. Phys. Lett., 1972, 21, 539.
29. Kobyakov A. et.al. // Advances in Optics and Photonics, 2010, 2, 1 1.

30. Gioretta F. R. et.al. // Nature Photonics, 2013, 7, 6 434.
31. Hocker G. B. // Appl. Opt., 1979, 18, 9 1445.
32. Grosch G. // Phys. Rev. B, 1998, 57, 8178.
33. Kersey A. et.al. // Electronics Lett., 1991, 27, 518.
34. Ma L. S. et.al. // Opt. Lett., 1994, 19, 21 1777.
35. Lopez O. et.al. // Optics Express, 2012, 20, 21 23518.
36. Lisdar C. et.al. // Nature Commun., 2016, 7, 12443.
37. Kuhl A. et.al.- 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), Orlando, FL, USA, 2019, pp. 1-2.,
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8855994>
38. Denker H. et.al. // Journal of Geodesy, 2018, 92, 487.
39. Ushijima, I. et.al. // Nature Photonics 2015, 9, 185.
40. Takano T. et.al. // Nature Photonics, 2016, 10, 662.
41. Grotti J. et.al. // Nature Physics, 2018, 14, 437.
42. Lisdar C. et.al. Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2019, EGU2019-14630, 2019, 21,
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-14630.pdf>