

Оптический репер частоты для применения в национальной шкале времени

Д.В.Сутырин, О.И.Бердасов, С.Ю.Антропов, А.Ю.Грибов, Р.И.Балаев, Е.Ф.Стельмашенко, Д.М.Федорова, А.Н.Малимон, С.Н.Слюсарев

Описана экспериментальная реализация введения в состав первичного эталона ГЭТ 1-2018 оптического стандарта частоты на атомах стронция в качестве оптического репера частоты. Предложена новая модель определения локальной атомной шкалы времени с использованием оптического репера в составе комплекса воспроизведения единиц первичного эталона. Представлены предварительные результаты сравнений частот оптического репера и водородного мазера, входящего в состав хранителей частоты и времени первичного эталона.

Ключевые слова: оптический стандарт частоты, атомы стронция, первичный эталон, национальная шкала времени.

1. Введение

Время и частота – физические величины, которые могут быть измерены с наименьшей неопределенностью, занимают особое место в физике. Атомные стандарты частоты, основанные на реперном переходе между энергетическими уровнями сверхтонкой структуры основного уровня атома ^{133}Cs , определяют секунду в международной системе единиц СИ. Относительная неопределенность частоты лучших цезиевых фонтанов находится на уровне единиц 10^{-16} [1, 2]. Однако оптические стандарты частоты (ОСЧ) демонстрируют лучшую стабильность и точность воспроизведения частоты. ОСЧ на основе различных атомов и реперных переходов [3–11] уже созданы или активно разрабатываются в ведущих метрологических центрах и научных лабораториях мира. Мотивация таких работ – переопределение секунды СИ на основе квантового перехода в оптической области [12] либо уменьшение неопределенности локальных шкал времени.

ОСЧ на холодных атомах в оптической решетке показали систематическую неопределенность частоты на уровне 10^{-17} – 10^{-18} [7] и лучшую стабильность частоты [13]. Это позволяет проводить сличения частот ОСЧ между собой с меньшей погрешностью и за меньшее время, чем при сличении микроволновых реперов [14]. В частности, различные научные группы разработали ОСЧ на нейтральных атомах стронция [15–17].

Д.В.Сутырин, С.Ю.Антропов, Р.И.Балаев, Е.Ф.Стельмашенко, А.Н.Малимон, С.Н.Слюсарев. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; e-mail: sutyrin@vniiftri.ru, amalimon@mail.ru, serslyu@mail.ru, santro@mail.ru

О.И.Бердасов, А.Ю.Грибов, Д.М.Федорова. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: berd_7@mail.ru, gribov.art@mail.ru, dmfedorova@vniiftri.ru

Поступила в редакцию 24 октября 2018 г., после доработки – 23 ноября 2018 г.

Во ФГУП ВНИИФТРИ разработан ОСЧ на нейтральных атомах ^{87}Sr , который включен в комплекс воспроизведения единиц времени и частоты первичного эталона ГЭТ1-2018. В настоящей работе предложена новая математическая модель формирования шкалы времени, в которой ОСЧ рассматривается в качестве одного из реперов частоты наравне с цезиевыми и рубидиевыми фонтанами, т.е. является оптическим репером частоты (ОРЧ). Предложенная модель согласуется с официально принятой моделью, формирующей шкалу Универсального координированного времени UTC(SU) на уровне 3×10^{-16} за время наблюдения в течение 7 месяцев. Экспериментальная реализация регулярных сличений частот ОРЧ с другими реперами в рамках новой модели осуществляется в процессе накопления данных на продолжительном временном интервале.

2. Мотивация работы

Впечатляющий прогресс в создании ОСЧ [13, 18–25] привел к дискуссии о необходимости переопределения секунды в системе СИ [12, 23, 24]. Первым шагом стало выявление подходящих оптических переходов с целью вторичного переопределения секунды Международным комитетом мер и весов [25, 26]. Вопрос практической реализуемости переопределения секунды СИ сейчас активно исследуется ведущими метрологическими центрами мира [17, 27, 28]. Проблемой является то, что ОСЧ, вообще говоря, не функционируют непрерывно, что существенно для практической реализации шкалы времени (ШВ).

На сегодняшний день UTC создается постобработкой среднемесячного взвешенного значения времени, которое хранится пятьюстами микроволновыми атомными часами национальных первичных эталонов мира. Для практических задач необходим доступ к значению времени в любой момент. Поэтому национальные первичные эталоны генерируют свою локальную ШВ в реальном времени с привязкой к частоте непрерывно функционирующего микроволнового генератора, например водородного мазера (ВМ). Это позволяет синхронизировать локальную ШВ со шкалой UTC на протяжении месяца.

Метрологические центры, в которых находятся первичные эталоны, синхронизируют свои ВМ на более коротком временном интервале путем сравнения их частот с частотами цезиевых реперов.

Благодаря процедуре усреднения шкала UTC более стабильна, чем у большинства локальных ШВ, точность которых ограничена точностью атомного репера и его перерывами в работе. Таким образом, на практике качество локальной ШВ обычно оценивается через сравнение с UTC. Однако шкала UTC сама по себе не является идеальной опорной шкалой, и различие между UTC и ШВ, генерируемой локальным цезиевым репером, может достигать 0.1 нс/день.

Временная ошибка локальных ШВ может быть уменьшена более чем на порядок при использовании ОРЧ [17], что приведет к улучшению их предсказуемости. Сеть оптических часов при одновременном улучшении технологии передачи времени [29] позволит создать гораздо более стабильную ШВ, чем шкала UTC. Это будет крайне важно для глобальных навигационных систем, астрофизики и фундаментальной науки.

3. ОРЧ в составе комплекса воспроизведения единиц времени и частоты

3.1. Связь ОРЧ с классическими реперами частоты

Комплекс воспроизведения единиц времени и частоты Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭТ1-2018) включает в себя два метрологических цезиевых репера (МЦР) и ОРЧ на холодных атомах стронция. Доверительные границы неисключенной систематической погрешности воспроизведения первичным эталоном единиц частоты не превышают 5×10^{-16} при уровне доверительной вероятности 0.99.

В состав ГЭТ1-2018 входит также комплекс хранения национальной ШВ, в котором есть ВМ, выполняющие роль хранителей единиц частоты и времени, с долговременной нестабильностью частоты, меньшей уровня 5×10^{-16} на интервале времени измерения 1 сутки. Помимо ВМ, в состав этого комплекса входят хранители на основе фонтана атомов рубидия [30]. Следует отметить, что реперы МЦР и ОРЧ включаются в работу периодически, а группа ВМ работает непрерывно, обеспечивая хранение размера единиц и ШВ. Значение частоты, генерируемое каждым ВМ, определяется в процессе ее сличения с реперной частотой.

ОРЧ размещен в оптической лаборатории, расположенной на расстоянии около 1 км от здания, в котором находится группа ВМ и микроволновых реперов, входящих в состав ГЭТ1-2018. В этой же лаборатории размещен опорный мазер ВМ 18, относительно частоты которого измеряется частота ОРЧ. Для определения абсолютного значения частоты ОРЧ опорный мазер ВМ 18 должен сличаться с хранителями ВМ из состава ГЭТ1-2018. Для выполнения таких сличений выходной сигнал ВМ 18 с частотой 5 МГц передается оптической несущей с длиной волны 1.3 мкм по волоконному кабелю к фазовым компараторам, входящим в комплекс хранения национальной ШВ ГЭТ1-2018. Для повышения достоверности результатов сличений выходной сигнал ВМ 44 (10 МГц) из состава хранителей ГЭТ1-2018 передается по волоконному кабелю в оптическую лабораторию. Сравнение ча-

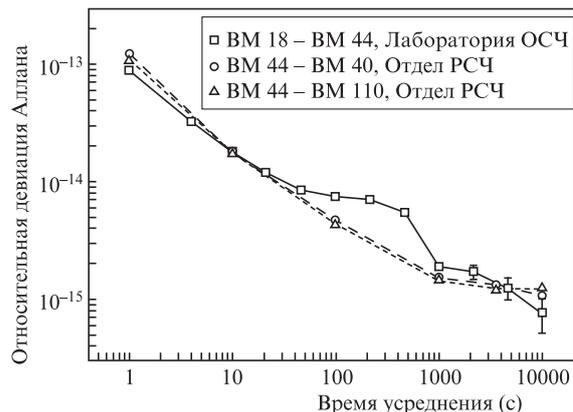


Рис.1. Результат сличений частот водородных мазеров в лаборатории ОСЧ и отделе эксплуатации ГЭВЧ (отдел РСЧ). Квадраты – сличение частот ВМ 18 и ВМ 44 с помощью компаратора, расположенного в лаборатории ОСЧ. Кружки и треугольники – сличение частот ВМ 44 с ВМ 40 и ВМ 110 с помощью компаратора, находящегося в отделе ГЭВЧ. Подъем кривой при сличениях ВМ 18 и ВМ 44 на интервалах усреднения 100–1000 с объясняется периодичностью включения кондиционера в помещении с измерительным оборудованием.

стот ВМ 44 и ВМ 18 проводится с помощью компаратора, установленного в оптической лаборатории. Испытания показали, что нестабильность частоты, которую дополнительно вносит система передачи эталонных сигналов по волоконному кабелю, не превышает 2×10^{-16} на интервале времени измерения 1 сутки.

На рис.1 представлены типичные результаты сличений частот ВМ в лаборатории ОРЧ и отделе эксплуатации ГЭВЧ. Подъем кривой при сличениях ВМ 18 и ВМ 44 на интервалах усреднения 100–1000 с объясняется периодичностью включения кондиционера, находящегося в помещении с измерительным оборудованием. В дальнейшем влияние нестабильности температуры, вызванной этими включениями, планируется устранить, разместив аппаратуру для сличений в специальном шкафу с постоянными климатическими условиями.

3.2. ОРЧ на атомах стронция

Структура и функционирование ОРЧ на атомах ^{87}Sr подробно описаны в работах [31–33]. Основными частями ОРЧ являются атомный спектроскоп, лазерные системы охлаждения и захвата атомов в оптическую ловушку, лазерная система с внешним высокодобротным ULE-резонатором для проведения спектроскопии «часового» перехода $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ в атомах ^{87}Sr и система управления рабочими циклами ОРЧ. Чтобы компенсировать изменение частоты «часового» лазера, вызванное дрейфом ULE-резонатора, используется акустооптический модулятор, осуществляющий подстройку частоты лазерного излучения на резонанс атомного перехода. В каждом рабочем цикле по результатам спектроскопии «часового» перехода рассчитывается частота подстройки. Используемый в настоящее время вариант схемы сличения ОРЧ с первичным эталоном представлен на рис.2.

В отличие от работы [31], ВМ 18 расположен в одном помещении с ОРЧ. Для переноса характеристик ОРЧ в радиодиапазон частот часть излучения лазера, настроенного на частоту «часового» перехода, служит для стабилизации частоты оптических биений f_{beat} между частота-

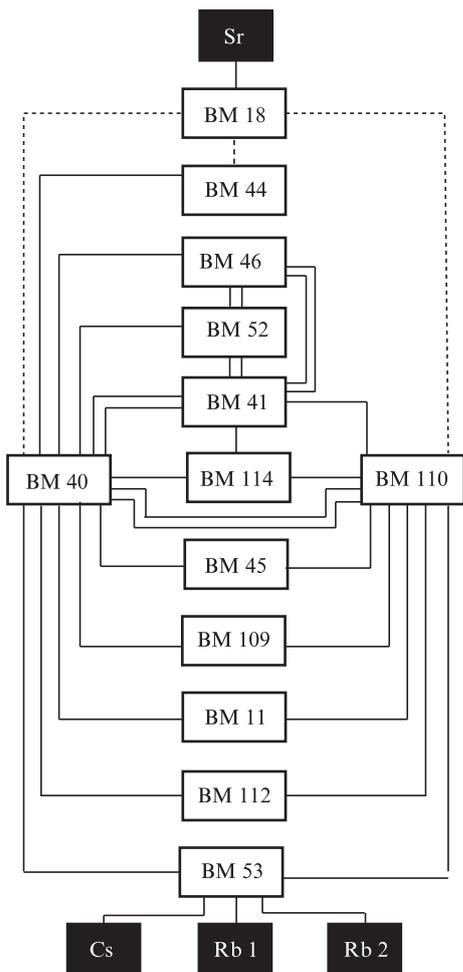


Рис.3. Используемая схема внутренних сличений частот генераторов. Сплошные линии – каналы наблюдения системы внутренних сличений, фиксирующие временные зависимости парных разностей частот; пунктирные линии – оптические каналы связи длиной ~1 км.

ных значений парных разностей частот генераторов i и j . Отклонения частоты опорных (подключенных к реперу частоты) ВМ, наблюдаемые в течение сеансов работы реперов частоты, фиксировались в виде приведенных к середине суток значений парной разности частот $\delta f_{rb}(t)$ репера (r) и опорного ВМ (b).

Передача единицы частоты от реперов (Rb, Cs) к ВМ осуществляется программным обеспечением ежедневно по данным наблюдений за период, который начинается за 3–5 месяцев до начала передачи и прекращается в момент окончания последнего сеанса сличений частоты опорного ВМ с репером частоты. Данные из массивов каждой парной разности частот $\delta f_{ij}(t)$ аппроксимируются полиномом второй степени методом наименьших квадратов. Линейная модель $M[i-j](t) = a_{ij} + b_{ij}t$, описывающая прогноз дрейфа разности частот для генераторов i и j , равно как и для опорного генератора и репера частоты $M[b-r](t) = a_{br} + b_{br}t$, определяется как уравнение касательной к данному полиному в точке, соответствующей концу интервала аппроксимации (рис.4).

Для системы ВМ и реперов частоты, изображенных на рис.3, введено понятие частоты атомной системы f_A , рассчитываемой программным обеспечением как набор поправок к частотам отдельных ВМ δf_{iA} , значение которых для момента времени t_0 определяется как

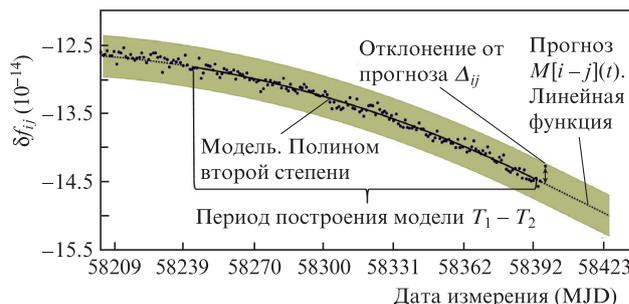


Рис.4. Результаты измерений парной разности частот (точки), аппроксимация полиномом второй степени на интервале времени $T_1 - T_2$ (сплошная линия) и линейный прогноз на будущее, соответствующий касательной к полиному в точке T_2 (пунктир).

$$\delta f_{iA}(t_0) = M[i-A](t_0) + \Delta_{iA}(t_0), \tag{3}$$

где $M[i-A](t_0)$ – прогнозируемое на основе предшествующих наблюдений отклонение частоты i -го ВМ от частоты атомной системы; $\Delta_{iA}(t_0)$ – отклонение частоты i -го ВМ от прогнозируемого, $M[i-A](t_0)$, оцениваемое по результатам наблюдаемых в момент времени t_0 парных разностей частот $\delta f_{ij}(t_0)$.

Модель, прогнозирующая дрейф частоты каждого i -го ВМ относительно воспроизводимой эталоном частоты атомных часов,

$$M[i-A](t) = a_i + b_i t, \tag{4}$$

определяется следующей системой уравнений:

$$a_{ij} + b_{ij}t = a_i + b_i t - a_j - b_j t, \tag{5a}$$

$$a_{br} + b_{br}t = a_b + b_b t - \delta f_{rA}, \tag{5b}$$

где δf_{rA} – отклонение частоты репера r от воспроизводимой группой стандартов частоты атомной системы. В (5a) число уравнений соответствует числу пар ij – линий между белыми прямоугольниками на рис.3, а в (5b) – числу связей, исходящих от реперов частоты (черные прямоугольники на рис.3).

Система уравнений (5a) и (5b) разделяется на две относительно переменных a_i и b_i , каждая из которых решается методом наименьших квадратов. Полученные в результате коэффициенты a_i и b_i определяют уравнение прогноза дрейфа частоты i -го стандарта относительно воспроизводимой группой стандартов частоты атомной системы (4).

Отклонение частоты i -го ВМ от прогноза $\Delta_{iA}(t_0)$ оценивается на основании наблюдаемых в момент t_0 значений парных разностей частот ВМ $\delta f_{ij}(t_0)$ посредством решения системы уравнений

$$\Delta_{ij}(t_0) = \Delta_{iA}(t_0) - \Delta_{jA}(t_0), \tag{6a}$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \Delta_{iA}(t_0), \tag{6b}$$

где $\Delta_{ij}(t_0) = \delta f_{ij}(t_0) - M[i-j](t_0)$ – отклонение наблюдаемого значения парной разности частот i -го и j -го генераторов от прогнозируемого. В (6a) число уравнений соответствует числу пар ij (линии между белыми прямоугольниками на рис.3), (6b) – нормирующее уравнение.

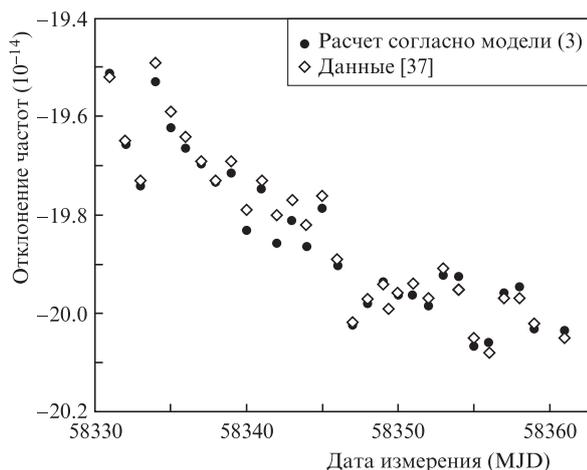


Рис.5. Отклонение частоты генератора VM 110 от частоты атомной системы, рассчитанное согласно формуле (3), и официальные данные ГЭВЧ, опубликованные в [37].

Группа уравнений (5), соответствующих каналам наблюдения системы внутренних сличений VM, описывает все имеющиеся между VM связи. Нормирующее уравнение (6б) фактически задает принцип оперативной оценки отклонения частоты какого-либо из VM от модели (4). Сумма отклонений от модели должна быть равна нулю – считается, что отклонение частот всей группы VM в среднем равно нулю, т.е. соответствует средней модели.

На рис.5 приведены результаты расчета поправок δf_{iA} для VM 110 за август, а также публикуемые в Бюллетене E [36] официальные отклонения частоты этого генератора от Атомного времени TA(SU). Средняя разность значений, приведенных на рис.5, за период с 01.03.2018 г. по 08.10.2018 г. составила 3.3×10^{-16} , что позволяет говорить о различии частот атомной системы, определяемой настоящим алгоритмом, и атомной системы, реализуемой на ГЭТ1-2018, в пределах нескольких единиц шестнадцатого знака.

Различие результатов определяется, в первую очередь, опорой только на два рубидиевых репера частоты, а также применяемой схемой наблюдений (внутренних сличений), которая, в частности, включает в себя связанный с тестируемым оптическим репером частоты генератор VM 18, и, кроме того, алгоритмом расчета δf_{iA} , использующим для передачи единицы частоты одновременно все связи (каналы наблюдения) между VM посредством систем уравнений (5) и (6), решаемых методом наименьших квадратов.

4. Текущие результаты

Как уже упоминалось в начале статьи, ОРЧ не может гарантированно работать непрерывно на суточном интервале на протяжении месяцев. Вполне достаточным может быть режим работы ОРЧ в течение 10^4 с несколько раз в неделю для управления частотой VM, участвующего в формировании локальной ШВ [28]. В настоящее время с такой периодичностью мы проводим сравнение частоты ОРЧ на атомах стронция с частотой VM 18. На рис.6 представлены дрейф частоты VM 18, вычисленный согласно модели из п.2.3, и экспериментально полученные сравнения частот ОРЧ и VM 18 за отдельные сутки. В настоящий момент измерения по текущей схеме сличений проведены на интервале времени 58227–58399 MJD (мо-

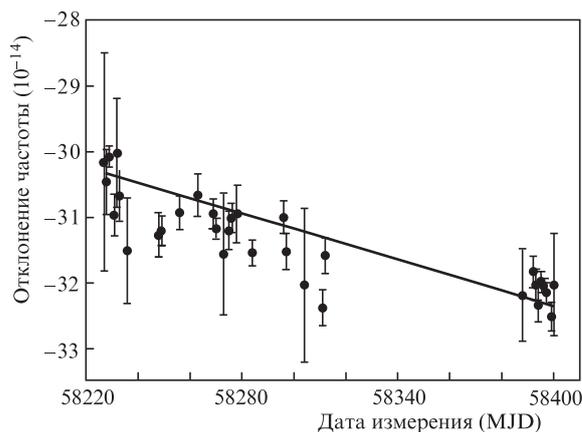


Рис.6. Экспериментальные данные сличений частот ОРЧ и VM 18. Сплошная линия – расчет по формуле (4) дрейфа частоты VM 18.

дифицированная юлианская дата $MJD = JD - 2400000.5$, где JD – юлианская дата; так, $MJD = 58227$ соответствует 00:00 19 апреля 2018 г.). Первые измерения на интервале 58220–58234 MJD характеризуются большими ошибками из-за настройки составных частей системы. После серии измерений (с 58313 по 58387 MJD) была взята пауза для улучшения отдельных узлов системы с целью увеличения длительности измерений. С момента 58388 MJD стартовала новая серия измерений, которая характеризуется меньшим разбросом результатов. Среднеквадратичное отклонение полученных в сеансах последней серии (всего 7 сеансов) отклонение частоты VM 18 от частоты ОРЧ составило 1.6×10^{-15} . Девиации Аллана отклонений частоты VM 18 от частоты атомной системы, рассчитываемые согласно (3) для времен усреднения 1 сутки и 3 суток, составляют соответственно 6×10^{-16} и 4×10^{-16} . Таким образом, основные источники неопределенности при сравнении частоты ОРЧ с ГЭТ1-2018 возникают при сравнении оптического перехода и VM 18. Уменьшение этой составляющей возможно за счет накопления статистических данных по многим сеансам измерений.

Представленные экспериментальные результаты являются предварительными, т.к. количества измерений на момент публикации статьи недостаточно для построения дрейфа частоты VM относительно ОРЧ и сравнения его с дрейфом VM 18, вычисленным согласно модели из п.2.3. Однако в последней серии измерений устойчивость и надежность работы системы существенно улучшена, а величина ошибки сличений ОРЧ с частотой VM 18 существенно уменьшена и ограничена нестабильностью температуры окружающей среды, которая будет уменьшена путем размещения части измерительного оборудования в камере постоянных климатических условий.

5. Заключение

Построен вариант экспериментальной схемы сличения ОРЧ с ансамблем водородных мазеров – хранителей частоты, цезиевыми и рубидиевыми реперами. Предложен новый алгоритм определения частоты атомной системы, в который может быть включен ОРЧ. Проведены экспериментальные сравнения модели дрейфа частоты VM по алгоритму и через сличения с ОРЧ.

Продолжение измерений в течение нескольких следующих месяцев позволит в итоге определить абсолютную частоту ОРЧ относительно Cs и Rb реперов и/или отно-

сительно шкалы времени ТАИ (International Atomic Time), которая связана со шкалой времени UTC. Это позволит включить ОРЧ в качестве репера в описанную выше математическую модель для определения атомного времени наравне с цезиевыми и рубидиевыми реперами частоты.

1. Blinov I. Yu. et al. *Measur. Techniques*, **60**, 30 (2017).
2. Levi F. et al. *Metrologia*, **51**, 270 (2014).
3. Poli N. et al. *Nuovo Cimento Rivista*, **36**, 555 (2013).
4. Pizzocaro M. et al. *Metrologia*, **54**, 102 (2017).
5. Huang Y. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 013001 (2016).
6. Huntemann N. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 063001 (2016).
7. Ushijima I. et al. *Nature Photon.*, **9**, 185 (2015).
8. Yamanaka K. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 230801 (2015).
9. Lemke N D. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 063001 (2009).
10. Madej A. A. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **109**, 203002 (2012).
11. Rosenband T. et al. *Science*, **319**, 1808 (2008).
12. Gill P. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **723**, 012053 (2016).
13. Hinkley N. et al. *Science*, **341**, 1215 (2013).
14. Nemitz N. et al. *Nature Photon.*, **10**, 258 (2016).
15. Hachisu H. et al. *Appl. Phys. B*, **123** (1), 34 (2017).
16. Lodewyck J. et al. *Metrologia*, **53**, 1123 (2016).
17. Grebing C. et al. *Optica*, **3** (6), 563 (2016).
18. Chou C.W. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 070802 (2010).
19. Dubé P. et al. *Phys. Rev. A*, **87**, 023806 (2013).
20. Bloom B.J. et al. *Nature*, **506**, 71 (2014).
21. Huntemann N. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 210802 (2014).
22. Godunet R.M. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 210801 (2014).
23. Riehle F.C.R. *Comptes Rendus*, **16** (5), 506 (2015).
24. Margolis H. *Nature Phys.*, **10**, 82 (2014).
25. Riehle F. et al. *Metrologia*, **55**, 188 (2018).
26. <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CIPM/CIM2013-EN.pdf>.
27. Hachisu H. et al. *Sci. Rep.*, **8**, 4243 (2018).
28. Hachisu H. et al. *Opt. Express*, **25** (8), 8511 (2017).
29. Sliwczynski Ł. et al. *Metrologia*, **50**, 133 (2013).
30. Blinov I. et al. *European Frequency and Time Forum (EFTF)* (IEEE, 2018. p. 257). DOI:10.1109/EFTF.2018.8409045.
31. Бердасов О. И. и др. *Квантовая электроника*, **48** (5), 431 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (5), 431 (2018)].
32. Бердасов О. И. и др. *Квантовая электроника*, **48** (5), 400 (2017) [*Quantum Electron.*, **48** (5), 400 (2017)].
33. Хабарова К.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **45** (2), 166 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (2), 166 (2015)].
34. Middelmann T.S. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **109**, 263004 (2012).
35. Westergaard P.G. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **106** (21), 210801 (2011).
36. <ftp://ftp.vniiftri.ru/BULLETTINS/E>.

ПОПРАВКА

Ч.Ву, С.Р.Аглям, Х.Жанг, К.В.Ларин. Определение зависимости скорости поверхностных волн в хрусталике глаза от внутриглазного давления методом оптической когерентной эластографии («Квантовая электроника», 2019, т. 49, № 1, с. 20–24).

В статье допущены следующие опечатки: на с. 20 в первом абзаце Введения вместо слова «близорукость» следует читать «дальнозоркость» (в трех случаях).