

Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины

© Д. А. Соколов, О. М. Олейник-Дзядик, И. С. Сильвестров

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Реферат

Входящий в состав ГЭТ 199–2018 эталонный измерительный комплекс длины (ЭИК) в диапазоне до 60 м является исходным средством измерительной техники в структуре эталона и предназначен для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы длины высокоточным средствам измерительной техники, а также обеспечивает прослеживаемость к эталону времени и частоты. С целью подтверждения высоких точностных характеристик рассматриваемого комплекса проведен анализ состояния подобных зарубежных комплексов и средств измерительной техники на основе данных сайта Международного бюро мер и весов (МБМВ), проведены совместные исследования метрологических характеристик ГЭТ 199–2018 и ГЭТ 192–2017 и представлены результаты испытаний абсолютных дальномеров (электронных тахеометров), демонстрирующие широкий круг применения ЭИК.

В соответствии с требованиями к эталонам ЭИК должен воспроизводить, хранить и передавать единицу длины. Для достижения поставленных целей используется одна из возможных рекомендаций МБМВ по воспроизведению единицы длины метр в соответствии с новым определением метра: косвенным методом измерения времени пролета импульса света до цели (отражателя) и обратно. Для достижения высокой точности измерения длины применяется лазер с малой длительностью импульса – фемтосекундный. Масштабным коэффициентом в данном способе воспроизведения единицы длины является периодичность повторения фемтосекундных импульсов. Функция хранения реализуется за счет системы фазовой стабилизации с опорой на ГЭТ-1 частоты повторения импульсов лазера и постоянный ее контроль в процессе измерения длины. Передача единицы длины осуществляется с помощью 64-метрового компаратора, помещенного в специальное изолированное помещение.

ЭИК имеет высокие точностные характеристики, соответствующие мировому уровню, что подтверждают данные подобных зарубежных комплексов, представленные на сайте МБМВ, а также совместные исследования с эталоном ГЭТ 192. Он имеет возможность передавать размер единицы длины как высокоточным средствам измерения, так и электронным тахеометрам.

Ключевые слова: измерение длины, воспроизведение единицы длины, фемтосекундный лазер.

Контакты для связи: Соколов Денис Александрович (sokolov@vniiftri.ru).

Статья поступила в редакцию 17.12.2019, принята к публикации 25.02.2020, опубликована 12.05.2020.

Для цитирования: Соколов Д. А., Олейник-Дзядик О. М., Сильвестров И. С. Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 63–67.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.63-67>

Reference Measuring Complex of Length within the Range up to 60 m from the State Primary Special Standard of a Unit of Length

D. A. Sokolov, O. M. Oleinik-Dzyadik, I. S. Silvestrov

Federal State Unitary Enterprise “National Research Institute for Physical and Technical and Radio Engineering Measurements”, Mendeleev, Moscow region, Russia

Abstract

The reference measuring complex of length (RMC), which is a part of the GET 199–2018, in the range up to 60 m is the initial means of measuring technology in the structure of the standard and is intended for reproducing, storing and transmitting the size of a unit of length to high-precision means of measuring equipment, and also provides traceability to the standard of time and frequency. In order to confirm the high accuracy characteristics of the complex under consideration, the state of such foreign complexes and measuring instruments was analyzed based on the website of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), joint studies of the metrological characteristics of GET 199–2018 and GET 192–2017. The results of the tests of absolute rangefinders (electronic total stations) are presented, demonstrating a wide range of RMC applications.

In accordance with the requirements for standards, the RMC must reproduce, store and transmit a unit of length. To achieve the set goals, one of the BIPM's possible recommendations for reproducing a unit length of a meter in accordance with the new definition of a meter was used, namely, an indirect method for measuring the time of flight of a light pulse to a target (reflector) and vice versa. To achieve high accuracy in measuring lengths, a femtosecond laser with a short pulse duration was used. The scale factor in this method of reproducing a unit of length is the repetition frequency

of femtosecond pulses. The storage function is realized due to the phase stabilization system based on the GET-1 laser pulse repetition frequency and its constant control during the length measurement. The transfer of a unit of length was carried out using a 64 meter comparator, placed in a special isolated room.

RMC has high accuracy characteristics that correspond to the world level, which is confirmed by the data of similar foreign systems presented on the BIPM website, as well as a joint research with the standard GET 192. It has the ability to transfer the size of a unit of length to both high-precision measuring instruments and electronic total stations.

Keywords: length measurement, single unit reproduction, meter definition, femtosecond laser.

Contacts: Denis Sokolov (sokolov@vniiftri.ru).

Received December 17, 2019, accepted February 25, 2020, published May 12, 2020.

For citation: Sokolov D. A., Oleinik-Dzyadik O. M., Silvestrov I. S. The reference measuring complex of length within the range up to 60 m from the State primary special standard of a unit of length // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 63–67.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.52.63-67>

Введение

В современном мире интенсивно осваивается область измерения больших и сверхбольших длин (от десятков метров до десятков тысяч километров), что приводит к возрастающей потребности в высокоточных инструментальных средствах. Этому способствуют расширяющаяся космическая деятельность и потребности в высокоточной геодезии и картографии, крупногабаритное машиностроение (авиастроение, судостроение, ракетостроение), землемерное дело, контроль за подвижками опасных природных и искусственных объектов (оползни, ледники, плотины, атомные станции и др.), высокоточные системы вооружений и др. Для обеспечения стандартизации в данной области существует Государственный первичный специальный эталон единицы длины, который является исходным средством линейных измерений высшей точности [1]. Входящий в его состав ЭИК является исходным средством измерительной техники в структуре Государственного первичного специального эталона единицы длины и предназначен для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы длины вплоть до 60 м высокоточными средствами измерений.

Единица длины внутри эталона передается от высокоточного интерферометра, созданного на основе фемтосекундного лазера, электронным тахеометром на непрерывной 60-метровой измерительной линии методом измерения одного и того же перемещения и поправки нуля-пункта. С помощью этих тахеометров измеряется геодезический базис длиной 1–3 км, на одном из пунктов которого располагается спутниковый лазерный дальномер и приемники сигналов ГНСС, подлежащие калибровке. Далее единица длины передается на 4000-километровый базис.

Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м на основе фемтосекундного лазера и измерительного базиса

ЭИК расположен в помещении отдельного здания с собственной системой вентиляции и кон-

диционирования, а также возможностью удаленного управления с рабочего места оператора вне помещения ЭИК. Фундамент комплекса имеет особую конструкцию, которая позволяет снизить внешние воздействия на комплекс.

Для перемещения отражателей лазерного излучения интерферометра на основе фемтосекундного лазера и отражателей средств измерительной техники, принимающих размер единицы длины, используется каретка с установленным высокоточным инклинометром. Сама каретка может перемещаться вдоль 64-метровой измерительной линии по рельсовым направляющим качения, которые уложены на прецизионно обработанные гранитные балки.

Для воспроизведения единицы длины применен высокоточный интерферометр собственной разработки. В основе его принципиальной схемы лежит неравноплечий интерферометр Майкельсона с фемтосекундным лазером в качестве источника когерентного излучения. Данный лазер имеет систему фазовой стабилизации частоты повторения импульсов F с опорой на рубидиевый стандарт, калибруемый на ГЭТ-1 (Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени). Излучение лазера распространяется вдоль измерительной линии до уголкового отражателя на измерительной каретке. Во время совпадения фемтосекундных импульсов от опорного и измерительного плеча возникает сигнал интерференции, повторяющийся при движении каретки с отражателями с периодичностью следования импульсов фемтосекундного лазера, образуя в пространстве многозначную меру. Расстояние между отсчетными точками меры, возникающими сигналами интерференции, определяется, в соответствии с рекомендациями BIPM по косвенному измерению времени прохождения света (в соответствии с определением метра) [2] как $D/2 = c/2nF \approx 2.5$ м, где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды, F – частота повторения фемтосекундных импульсов.

Метрологические характеристики и экспериментальные исследования по воспроизведению единицы длины ЭИК

Для исследования метрологических характеристик ЭИК проводились серии измерений по воспроизведению единицы длины, случайная погрешность данных измерений не превышает 1 мкм. СКО результатов измерений не превышает 1 мкм (табл. 1).

При стандартных условиях (101.325 Па, 20 °С, 50 % относительной влажности и 400 ppm CO₂) показатель преломления воздуха составляет ~00027 для длины волны 633 нм. Тогда пренебрежение показателем преломления при измерении длины в воздухе приводит к неточности приблизительно 0.27 мм на 1 м. Давление воздуха и температура являются наиболее критическими параметрами

из-за высокого коэффициента чувствительности показателя преломления воздуха n [2]. Поэтому для вычисления n вдоль измерительной линии расположено 40 датчиков температуры, 4 гигрометра и барометр. А система поддержания микроклиматических параметров спроектирована и настроена таким образом, чтобы максимально снизить градиент температур вдоль всей линии и уменьшить изменение этого параметра в процессе измерений.

Основные метрологические характеристики ЭИК в диапазоне до 60 м на основе фемтосекундного лазера и измерительного базиса представлены в табл. 2.

В соответствии с данными ВРМ [3] неопределенность измерений длины разработанного ЭИК соответствует зарубежным комплексам, работающим в подобном диапазоне длин (табл. 3).

Таблица 1

Серия измерений по воспроизведению единицы длины

Узел i	Время	Частота повт. имп., Гц	Ср. температура по дист., °С	Давление, Па	Влажность, %	Расч. эталонная дист., $L_i^{\text{расч}}$, м	Поправка воспроизведения эталонной дист. ΔL_i , мкм	Воспроизведенная длина $L_i^{\text{изм}}$, м	Случайная погрешность воспроизведения, мкм
0	13:32	61899118.4	22.62	97567	16.2	0	-1.57	0	0.13
1	13:39	61899118.4	22.62	97567	16.2	2420.985	-2	2420.983	0.16
10	13:42	61899118.4	22.6	97559	16.2	24209.849	-5.59	24209.845	0.53
11	13:54	61899118.4	22.6	97567	16.2	26630.833	-4.79	26630.828	0.39
20	13:59	61899118.4	22.64	97568	16.2	48419.699	-1.44	48419.697	0.71
21	14:06	61899118.4	22.65	97573	16.2	50840.684	-1.21	50840.682	0.25
24	14:20	61899118.4	22.63	97590	16.2	58103.634	-1.99	58103.633	0.31
25	14:28	61899118.4	22.62	97597	16.2	60524.617	-3.84	60524.614	0.74

Таблица 2

Метрологические характеристики ЭИК

Погрешность, мкм	
СКО результата измерений S (при 25 независимых измерений)	1
Неисключенная систематическая погрешность $\Theta(p)$ (при $p = 0.99$)	5
Неопределенность, мкм	
Стандартная неопределенность, оцененная по типу А	1
Погрешность, мкм	
Стандартная неопределенность, оцененная по типу В	2
Суммарная стандартная неопределенность	2.2
Расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $k = 2$	4.4

Возможности калибровки и измерения длины

№ п/п	Фирма, страна	Тип СИ	Диапазон, м	Неопределенность, мкм	Доверительный интервал, %
1	ВНИИФТРИ, Россия	Лазерный интерферометр	0...60	Q [1, 0.08L], L (м)	95
2	NPL, Великобритания.	Лазерный интерферометр	0...45	Q [0.08, 0.12L], L (м)	95
3	MIKES, Финляндия	Лазерный интерферометр	0...40	Q [0.02, 0.5L], L (м)	95
4	PTB, Германия	50 м ИЛ Лазерный интерферометр	0...50	Q [13.4, 0.72L], L (м)	95
5	NIM, Китай	Лазерный интерферометр	0...26	(0.14 + 3E-07L), L (м)	95
6	METAS, Швейцария	Лазерный интерферометр	1...50	Q [0.01, 0.07L], L (м)	95

Метрологические исследования средств измерительной техники

С целью обеспечения единства измерений единицы длины на ЭИК проводились совместные исследования метрологических характеристик ГЭТ 199–2018 и ГЭТ 192–2017 [4]. Со сторо-

ны ГЭТ 199 для воспроизведения единицы длины использовался интерферометр на основе фемтосекундного лазера, а со стороны ГЭТ 192 принимали участие средства измерительной техники: LaserTRACER-NG и Renishaw XL-80. Результаты исследований представлены на рис. 1 и 2. Исходные данные опубликованы ранее [4].

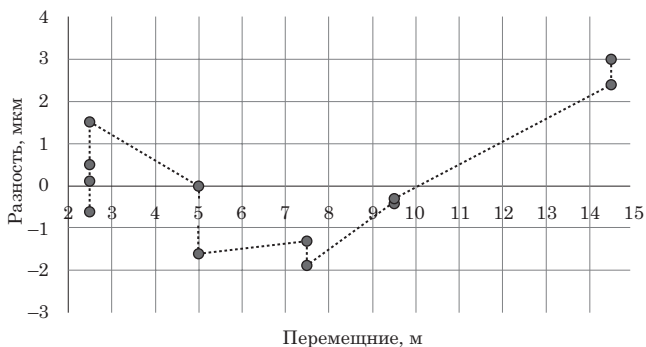


Рис. 1. Разности измеренных перемещений ГЭТ 199–LaserTRACER-NG

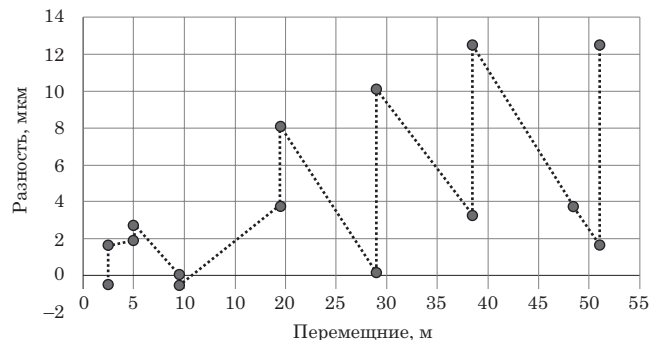


Рис. 2. Разности измеренных перемещений ГЭТ 199–XL-80

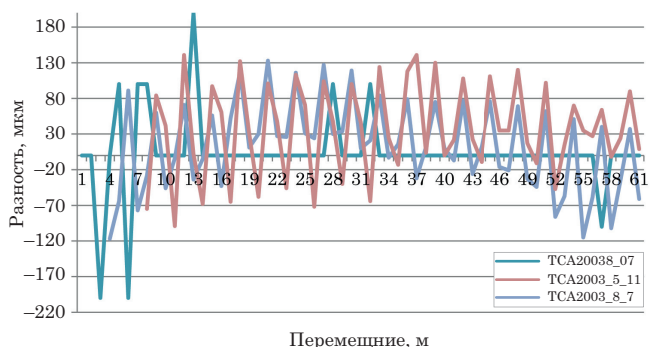


Рис. 3. Калибровка тахеометров

Данные графики демонстрируют зависимость разности измеренных перемещений при движении измерительной каретки с уголковыми отражателями интерферометра на основе фемтосекундного лазера из состава ГЭТ 199-2018 и средства измерительной техники из состава ГЭТ 192-2017. Полученные результаты показали соответствие заявленным метрологическим характеристикам участвующих в исследованиях эталонных установок, входящих в состав Государственных первичных эталонов единиц длины ГЭТ 192-2017 и ГЭТ 199-2018.

С целью калибровки электронных тахеометров на ЭИК проводятся исследования их метрологических характеристик, результаты таких измерений с использованием двух приборов TCA2003 представлены на рис. 3.

Полученные результаты показывают, что разброс разностей значений измеренной длины ЭИК и тахеометрами в зависимости от дистанции не имеет существенных отклонений от среднего. Один из приборов получил схожие величины при калибровке у производителя в 2007 г. (ряд TCA20038_07), а данные этого же прибора при калибровке в 2019 г. представлены рядом TCA2003_8_7.

Заключение

Для воспроизведения единицы длины в измерительном комплексе применен метод, основанный на регистрации максимумов совпадения фемтосекундных импульсов. Метод позволяет воспроизводить единицу длины, равную 2.5 м, определяемую частотой повторения импульсов лазера 61 МГц. Частота повторения импульсов и, следовательно, длина волны, лежит в радиодиапазо-

не, измеряется стандартным частотомером с опорой на рубидиевый стандарт. Лазер имеет систему фазовой подстройки частоты от внешнего опорного рубидиевого стандарта, обеспечивая связь с ГЭТ-1 [5]. Также данный комплекс имеет высокие точностные характеристики, что подтверждено совместными исследованиями, и широкий круг применения при испытаниях высокоточных средств измерения длины (интерферометров) и электронных тахеометров.

Л и т е р а т у р а

1. *Сильвестров И. С., Мазуркевич А. В., Верницкий Д. М. и др.* Государственный первичный специальный эталон единицы длины в диапазоне от 24 м до 4000 км // *Геопрофи.* 2016. № 2. С. 21–25.
2. *Mise en pratique for the definition of the metre in the SI: SI Brochure, 9th edition, Appendix 2.* 2019. URL: <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-mep/SI-App2-metre.pdf> (дата обращения 17.11.2019).
3. *Length > Dimensional metrology > Linear dimensions > Length instruments/ Line standards* URL: https://kcdb.bipm.org/AppendixC/country_list_search.asp?CountSelected=FI&type=L (accessed: 25.12.2020)
4. *Милованова Е. А., Маликов К. И., Иванникова Н. В. и др.* Совместные исследования метрологических характеристик комплекса государственных первичных эталонов единицы длины // *Измерительная техника.* 2018. № 9. С. 8–12.
5. *Васильев М. Ю., Татаренков В.М., Щипунов А. Н. и др.* Фемтосекундные технологии воспроизведения единицы длины метра на микронном уровне в диапазоне длин до 60 м // *Доклады VII международного симпозиума Метрология времени и пространства.* М.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014. С. 144–145.