

# Макет эталонного дальномера в диапазоне до 600 м на основе фемтосекундного лазера

*Д. А. Соколов*

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, р.п. Менделеево, г. Солнечногорск, Московская обл., Российская Федерация

В работе приведены результаты испытаний макета измерительного комплекса длины на основе фемтосекундного лазера в диапазоне 64 м ... 600 м в лабораторных и полевых условиях, оценена погрешность разрабатываемого макета при воспроизведении единицы длины на максимальной дистанции. Приведены значения соотношений сигнал/шум в данном диапазоне, которые составляют от 15 до 300 единиц. Исследованы метрологические характеристики макета, в части СКО ( $S_{\Sigma}$ ), в лабораторных условиях до 311 м  $S_{\Sigma} = 13$  мкм, а в полевых на дистанциях: 572 м  $S_{\Sigma} = 10$  мкм. В целом испытания макета показали высокие точностные характеристики, а запас мощности и соотношение сигнал/шум позволяют увеличить диапазон воспроизведения единицы длины.

*Ключевые слова:* фемтосекундный лазер, эталонный дальномер до 600 м.

*Цитирование:* Соколов, Д. А. Макет эталонного дальномера в диапазоне до 600 м на основе фемтосекундного лазера / Д. А. Соколов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 256–261.

## Введение

В связи с расширением задач измерения длины и повышенного внимания к высокоточным измерениям больших длин в машиностроении, мониторинге промышленных объектов, геодезии, картографии и т.д. Возрастают требования к точности средств измерения длины в диапазоне до 600 м, а также к эталонам возглавляющих поверочную схему.

В исследуемом диапазоне измерения длины с учетом специфики применения разрабатываемого макета наиболее перспективными являются технологии:

- EDM (электронные измерения расстояний) является наиболее распространенным способом измерения больших расстояний. Основой реализации технологии EDM является оптоэлектронный способ сдвига фазы амплитудно-модулированного лазерного излучения. В сравнении с интерференционным способом основанного на применении технологии EDM, на порядки ниже, но позволяет проводить однозначные измерения на больших расстояниях, не используя непрерывную измерительную линию.

- Благодаря достижениям в освоении фемтосекундных технологий данные лазерные источники излучения стали применяться в области измерения длин. Если частота повторения фемтосекундных импульсов привязана по фазе к стандарту частоты, то такие измерения могут быть приведены в соответствие с международным определением метра. Причем фемтосекундный лазер можно применять как в интерференционных, так и в EDM системах, а также их комбинации в одном приборе, что позволяет уменьшить диапазон

неоднозначности измерений с одной стороны и повысить точность до уровня интерференционной с другой.

### **1. Макет эталонного дальномера**

В данной работе применены фемтосекундные технологии для дальномерных измерений. В целях обеспечения единства измерений больших длин была проведена разработка и исследование макета эталона единицы длины на основе фемтосекундного лазера, обеспечивающего независимое воспроизведение, хранение и передачу единицы длины в соответствующем диапазоне [1, 2, 3].

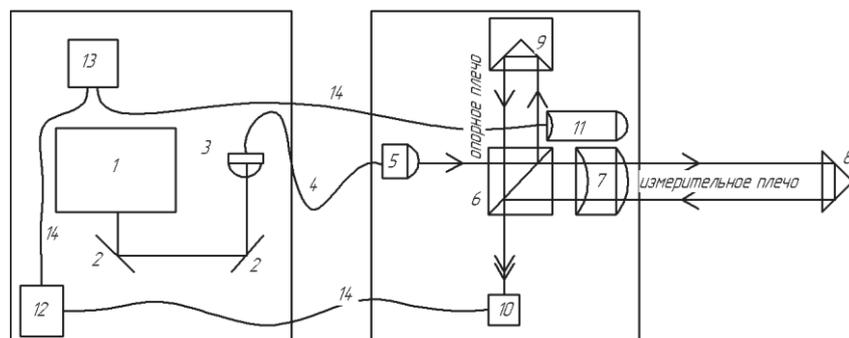
Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Оценка возможности применения разрабатываемого макета для измерения длин до 600 м.
2. Оценка погрешности разрабатываемого макета.
3. Проверка работоспособности разрабатываемого макета на дистанциях 60 м, 300 м, 600 м.
4. Оценивание характеристик входного сигнала разрабатываемого макета на дистанциях 60 м, 300 м, 600 м.
5. Вычисление погрешности измерения (СКО) длины разрабатываемого макета на 60 м, 300 м, 600 м.

На рисунке 1 приведена схема установки реализующая макет эталона длины на основе фемтосекундного лазера [4]. Вдоль измерительного плеча перемещается отражатель 8, изменяя разность хода волн между плечами интерферометра, а аппаратура приема 10 регистрирует сигналы интерференции.

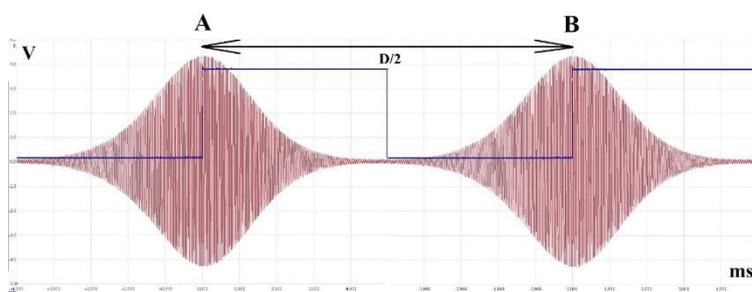
Устройство внутрифазовой модуляции 9 периодически (частотой 3 Гц) изменяет разность хода волн между опорным и измерительным плечом интерферометра, что позволяет регистрировать совпадения фемтосекундных импульсов при визуальной и цифровой обработке сигнала [2].

Источником излучения является фемтосекундный лазер 1 на длине волны 0,780 мкм с системой стабилизации частоты повторения импульсов 61 МГц. Для получения высокой стабильности частоты повторения импульсов используется метод фазовой подстройки по частоте от внешнего опорного рубидиевого стандарта частоты [5].



1- стабилизированный фемтосекундный лазер; 2- плоские зеркала; 3 – волоконный ввод; 4 – оптическое волокно; 5 – волоконный коллиматор; 6 - делительный кубик; 7 – коллиматор; 8 - пустотелый уголкоый отражатель; 9 - устройство внутрифазовой модуляции и пустотелый уголкоый отражатель; 10 - аппаратура приема лазерного излучения; 11 – система визуального контроля наведения на отражатель; 12 – система обработки сигнала; 13 – ноутбук; 14 – электрические кабели

**Рис. 1.** Принципиальная схема лазерного дальномера



**Рис. 2.** Сигнал интерференции фемтосекундных импульсов при перемещении отражателя измерительного плеча

На рисунке 2 представлен сигнал интерференции двух совмещенных в пространстве лазерных пучков, в зависимости от положения отражателя 8 (рис. 1) вдоль распространения измерительного плеча интерферометра [6]. Данная картина возникает в результате работы устройства внутрифазовой модуляции и совпадении фемтосекундных импульсов [4] от опорного и измерительного плеча.

В результате расчета мощности выходящего лазерного излучения из оптической системы на измерительную линию с использованием паспортных данных составных элементов и измерений их коэффициентов отражений была оценена: мощность лазерного излучения на выходе из оптической системы на измерительную линию 12,2 мВт, мощность лазерного излучения на входе в оптическую систему с измерительной линии 600 м в ясную погоду 0,07 мВт и минимальная мощность на входе в оптическую систему с измерительной линии 0,03 мВт. Данные результаты подтверждают возможность применения разрабатываемой оптической системы в исследуемом диапазоне длин.

На основе паспортных данных и теоретических оценок бюджет погрешности разрабатываемого метода воспроизведения единицы длины имеет следующие составляющие:

- частота повторения импульсов лазера,

- дифракционная составляющая,
- температура,
- давление,
- относительная влажность,
- концентрация CO<sub>2</sub>,
- расчёт по формуле,
- неоднородность внешних условий,
- Аббе угла наклона отражателя,
- дальномерная поправка,
- механизм фиксации трегера,
- косинусная ошибка.

Суммарная н.с.п. результата измерения длины 600 м составляет:  $\Theta_{0,95} = 195,2$  мкм

## 2. Экспериментальные исследования

С помощью исследуемого макета:

- проведена серия измерений по воспроизведению длины 60 м в лабораторных условиях на макете эталонного измерительного комплекса длины в диапазоне до 60 м [4]:

- СКО измерения длины 2426,771 мм составляет 0,005 мм;
- СКО измерения длины 24267,700 мм составляет 0,002 мм;
- СКО измерения длины 58242,481 мм составляет 0,005 мм;
- Соотношение сигнал/шум на дистанции 64 м составило 300 единиц;

- проведена серия измерений по воспроизведению и измерению длины до 311 м в лабораторных условиях на макете эталонного измерительного комплекса длины в диапазоне до 60 м, результаты СКО воспроизведения длины, а также СКО тахеометра ТМ30, используемого в качестве опорного дальномера работающего по EDM технологии, представлены в таблице 1

**Таблица 1.** СКО измеренных расстояний

№	время	ТМ30	S <sub>Σ</sub> , мм	макет	S <sub>Σ</sub> , мм
1	10:35	63,5178	0,16	63,09602	0,005
2	11:05	63,5177	0,15	63,09605	0,005
3	13:15	247,9513	0,18	247,53029	0,011
4	14:05	311,0472	0,17	310,62625	0,010
5	15:00	311,0474	0,16	310,62636	0,013

Соотношение сигнал/шум на дистанции 311 м составило 30 единиц. Серии измерений по воспроизведению длины 572 м в полевых условиях показали следующие результаты: тахеометр ТМ30 измерил данное расстояние с S<sub>Σ</sub> = 0,14 мм, а разрабатываемый макет воспроизвел данную длину с S<sub>Σ</sub> = 0,01 мм. Проведены измерения средних значений сигнала и шума, а также соотношение сигнал/шум, которое составило 15 единиц.

## Заклучение

Для решения некоторых задач метрологического обеспечения длин в диапазоне 64 м ... 600 м была предложена концепция и реализована в виде макета эталона единицы длины, использующего частотную гребенку фемтосекундного лазера, которая имеет систему фазовой стабилизации по тактовому сигналу Rb стандарта частоты и времени. Воспроизведение единицы длины на отметках 64 м, 182 м, 300 м и 575 м было успешно продемонстрировано с СКО не более 13 мкм. Концепция воспроизведения длины предложенная в этом исследовании, найдет свое применение в различных научных и промышленных областях из-за ее высокой точности и прослеживаемости к международному определению метра.

## Список источников

- [1] BIPM, The International System of Units (SI Brochure) [9th edition, 2019], <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>.
- [2] Terrien J. News from the Bureau International des Poids et Mesures // Metrologia. – 1975. – Т. 11. – №. 1. – С. 37.
- [3] <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-metre.pdf>
- [4] 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 Института прикладной астрономии РАН. – 2020. – №. 52. – С. 63-67.
- [5] Патент На Изобретение Ru 2698699 C1/ Способ воспроизведения единицы длины в лазерных дальномерах на основе интерферометра Майкельсона Губин С.А., Соколов Д.А., Татаренков В.М., 29.08.2019. Заявка № 2018147034 От 27.12.2018.
- [6] Sokolov D. The reference range finder based on the femtosecond laser for the length measurement in the range up to 60 m. Design and application //Український метрологічний журнал/Ukrainian Metrological Journal. – 2017. – №. 1A. – С. 31-34.

## Prototype of a reference rangefinder in the range up to 600 m based on a femtosecond laser

*D. A. Sokolov*

FSUE «Russian metrological institute of technical physics and radio engineering», Solnechnogorsk, Russia

The paper presents the results of testing a prototype of a length measuring complex based on a femtosecond laser in the range of 64 m ... 600 m in laboratory and field conditions, the error of the developed model when reproducing a unit of length at a maximum distance is estimated. The values of the signal-to-noise ratios in this range are given, which range from 15 to 300 units. The metrological characteristics of the prototype were investigated, in terms of RMS (S), under laboratory conditions up to 311 m  $S = 13$  microns, and in field conditions at distances: 572 m  $S = 10$

microns. In general, the tests of the prototype showed high accuracy characteristics, and the power reserve and signal-to-noise ratio allow increasing the reproduction range of a unit of length.

*Keywords:* Femtosecond laser, Reference rangefinder up to 600 m.