

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-82-92

УДК 006.91

# Методы повышения точности измерений длины лазерными фазовыми дальномерами

Дарья Александровна Любченко<sup>1</sup>✉,  
Олег Викторович Колмогоров<sup>2</sup>

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,  
Менделеево, Московская обл., Россия

<sup>1</sup>lubchenko@vniiftri.ru <https://orcid.org/0009-0006-5228-8095>

<sup>2</sup>kolmogorov@vniiftri.ru <https://orcid.org/0000-0001-9051-6227>

## Аннотация

**Предмет исследования.** Методы повышения точности измерений длины лазерными фазовыми дальномерами на дистанции до 3000 м. Аппаратура лазерного фазового дальномера, в том числе для создания отечественных эталонных средств измерения. **Цель работы.** Разработка и исследование методов повышения точности измерений длины и создание высокоточных лазерных фазовых дальномеров с погрешностью не более 1,3 миллиметра на дистанции до 3000 метров для использования их в качестве эталонов длины. **Методы.** Метод уменьшения погрешности определения разности фаз сигналов основан на использовании устройства цифровой регистрации и обработки сигналов путём вычисления разности фаз с помощью специально разработанного вычислительного алгоритма на основе фурье-анализа. Метод учёта долговременного дрейфа разности фаз сигналов между опорным и измерительным каналами путём введения поправки, получаемой с помощью опорной оптической линии задержки. **Основные результаты.** Показано, что разработанный макет для исследований методов повышения точности измерений длины, на основе которых могут разрабатываться высокоточные лазерные фазовые дальномеры, позволяет проводить измерения приращений длины с погрешностью, не превышающей 1,3 мм при ослаблении на трассе, эквивалентной дистанции до 3000 м. **Практическая значимость.** Предложенные в работе методы уменьшения погрешности измерений длины лазерными фазовыми дальномерами, основанные на использовании расчёта разности фаз сигналов с помощью фурье-анализа и учёта долговременного дрейфа разности фаз сигналов в каналах за счёт использования опорной оптической линии задержки, могут быть реализованы в аппаратуре высокоточных лазерных фазовых дальномеров.

**Ключевые слова:** лазерный фазовый дальномер, разность фаз сигналов, фурье-анализ, опорная линия задержки

**Ссылка для цитирования:** Любченко Д.А., Колмогоров О.В. Методы повышения точности измерений длины лазерными фазовыми дальномерами // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 82–92. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-82-92>

Коды OCIS: 070.0070, 120.0120, 140.0140, 200.0200, 230.0230, 250.0250.

# Methods for improving the accuracy of length measurements by laser phase rangefinders

DARIA A. LUBCHENKO<sup>1</sup>✉, OLEG V. KOLMOGOROV<sup>2</sup>

All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia

<sup>1</sup>lubchenko@vniiftri.ru <https://orcid.org/0009-0006-5228-8095>

<sup>2</sup>kolmogorov@vniiftri.ru <https://orcid.org/0000-0001-9051-6227>

## Abstract

**The subject of study** is methods for improving the accuracy of length measurements with laser phase rangefinders at a distance of up to 3000 meters, as well as laser phase rangefinder equipment, including for the creation of domestic reference measuring instruments. The **aim of study** is the investigation of methods for improving the accuracy of length measurements in order to develop high-precision laser phase rangefinders with an error not exceeding 1.3 millimeters at a distance of up to 3000 meters. **Methods.** The method of reducing the error in determining the phase difference of signals is based on the use of a digital signal recording and processing device by calculating the phase difference using a specially developed computational algorithm based on Fourier analysis. Also the method for taking into account the long-term drift of the phase difference of signals between the reference and measuring channels by introducing a correction obtained by means of a reference optical delay line was applied. **Main results.** It is shown that the developed model for the study of methods for improving the accuracy of length measurements, on the basis of which the high-precision laser phase rangefinders can be developed, allows for measuring the length increments with an error not exceeding 1.3 millimeters with attenuation on the track equivalent to a distance of up to 3000 meters. **Practical significance.** The proposed methods for reducing the error of length measurements by laser phase rangefinders, based on the use of calculating the phase difference of signals by means of Fourier analysis and taking into account the long-term drift of the phase difference of signals in channels due to the use of the reference optical delay line can be implemented in the equipment of high-precision laser phase rangefinders.

**Keywords:** laser phase rangefinder, signal phase difference, Fourier analysis, delay reference line

**For citation:** : Lubchenko D.A., Kolmogorov O.V. Methods for improving the accuracy of length measurements by laser phase rangefinders [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 4. P. 82–92. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-82-92>

**OCIS codes:** 070.0070, 120.0120, 140.0140, 200.0200, 230.0230, 250.0250.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для обеспечения функционирования цифрового производства, а также для обеспечения высокоточных измерений в геодезии и других сферах деятельности, используются средства измерений, в конструкцию которых включены лазерные дальномеры [1]. Как правило, такие средства измерений работают в условиях открытой атмосферы в диапазонах измерений от единиц метров до трёх километров [2, 3]. Погрешность измерений таких средств варьируется от десятых долей миллиметра до единиц миллиметров в зависимости от класса точности и диапазона измерений используемого средства. Одновременно, необходимо учитывать, что разви-

тие научно-технического прогресса привело к уменьшению погрешности лазерных дальномеров более, чем в два раза за последние десять лет. Такая тенденция уменьшения погрешности сохраняется и в настоящее время, что вызвано развитием методов цифровой обработки измерений, достижениями в современной науке и вычислительной технике, а также использованием новых технологий лазерной дальнометрии [4–6]

Исходя из требований Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ, все промышленные и геодезические средства измерений, включая лазерные светодальномеры, используемые на территории Российской Федерации, относятся

к сфере обязательного Государственного регулирования и, соответственно, должны проходить процедуры утверждения типа и поверки. Для обеспечения проведения данных процедур применяются государственные рабочие эталоны единицы длины, которые в соответствии с Государственной поверочной схемой для координатно-временных средств измерений (далее ГПС) должны прослеживаться к Государственному первичному специальному эталону единицы длины (далее ГЭТ 199). Исходя из требований ГПС, для определения погрешности средств измерений длины должно обеспечиваться соотношение погрешности эталона к исследуемому средству измерений длины не менее, чем 1:2 [7–9].

В соответствии с ГПС предел допускаемой абсолютной погрешности измерений длины фазовых светодальномеров, дальномеров, тахеометров в классе средств измерений варьируется от 3,4 мм до 30,4 мм, в классе эталонов 1 разряда составляет 1,7 мм на дистанции 3000 м, однако данные эталоны являются покупными зарубежными изделиями.

Таким образом, для метрологического обеспечения современных высокоточных средств, имеющих в своём составе светодальномеры, необходимо разрабатывать отечественные эталоны длины, не уступающие по точности зарубежным аналогам.

В связи с этим, целью данной работы является разработка и исследование методов повышения точности измерений длины и создание высокоточных лазерных фазовых дальномеров с погрешностью не более 1,3 миллиметра на дистанции до 3000 метров для использования их в качестве эталонов длины.

### **МАКЕТ ВЫСОКОТОЧНОГО КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИРАЩЕНИЙ КООРДИНАТ**

Для создания новых высокоточных эталонов единицы длины в настоящее время требуется поиск методов повышения точности аппаратуры дальномеров. Из анализа существующих методов измерений длины выявлено, что наибольшей точности измерений на больших расстояниях позволяет достичь фазовый метод. Кроме того, фазовый метод является основным методом определения расстояний, применяемым в эталонах и высокоточных средствах из-

мерений длины. Поэтому представляется целесообразным найти пути уменьшения погрешности измерений длины фазовым методом.

При реализации лазерного фазового дальномер (ЛФД) фазовый метод измерений расстояний предполагает измерения разности фаз между опорным сигналом и сигналом, прошедшим измеряемую трассу в прямом и обратном направлении, и последующем расчёте значений длины на основе данных о частоте следования лазерных импульсов и скорости их распространения на трассе [10, 11].

Для исследования путей повышения точности измерений длины фазовым методом разработан макет высокоточного комплекса средств измерений приращений координат (МКСИК), представляющий собой высокоточный лазерный фазовый дальномер [11–13].

МКСИК предназначен для проведения исследований с целью определения основных направлений работ по созданию комплекса отечественных средств передачи единиц величин к рабочим средствам измерений при измерении приращений координат в диапазоне до 3 км. Это необходимо для расширения функциональных и точностных характеристик существующих и перспективных средств метрологического обеспечения измерений приращений координат с целью решения задач обеспечения единства измерений в таких областях как фундаментальное обеспечение глобальных навигационных спутниковых систем, геодезия и картография, транспорт.

Принцип действия МКСИК состоит в следующем. В МКСИК излучаемые лазерные импульсы поступают на светоделитель, который разделяет их на два канала — опорный и измерительный. Сигнал опорного канала поступает через фотоприёмное устройство 1 на цифровой запоминающий осциллограф (ЦЗО). Сигнал измерительного канала проходит по измеряемой трассе до отражателя в прямом и обратном направлении, далее через фотоприёмное устройство 2 поступает в ЦЗО. ЦЗО служит для регистрации и обработки сигналов на основе метода фурье-анализа, а также для управления аппаратурой МКСИК [11–13]. Перемещение отражателя вдоль трассы вызывает изменение разности фаз сигналов в опорном и измерительном каналах.

Для учёта долговременного дрейфа разности фаз между опорным и измерительным

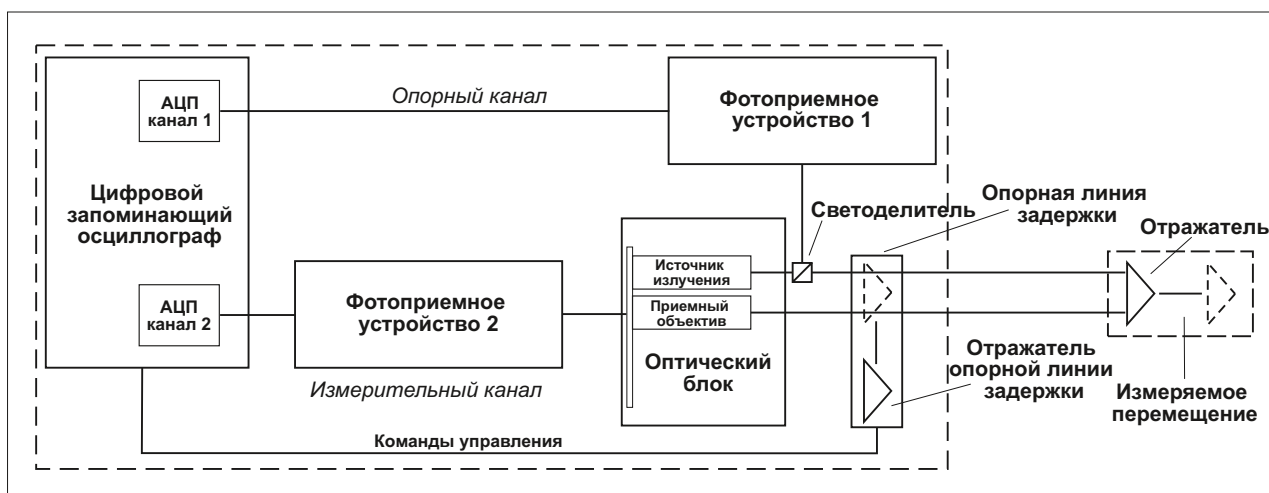


Рис. 1. Функциональная схема МКСИК и измеряемой трассы

Fig. 1. Functional diagram of the layout of a high-precision complex of measuring instruments for increments of coordinates and the measured route

каналами используется опорная линия задержки (ОЛЗ). Принцип действия ОЛЗ заключается в следующем: коммутатор ОЛЗ направляет излучение от источника излучения на короткую ОЛЗ, задержка в которой известна. Излучение проходит через ОЛЗ и поступает в фотоприёмный блок. Далее измеряется задержка в ОЛЗ с помощью МКСИК. Разница результатов измерений МКСИК и известного значения задержки распространения сигнала в ОЛЗ является поправкой к измерениям.

Обобщённая схема МКСИК с цифровой регистрацией сигналов приведена на рис. 1.

Пунктирной линией на рис. 1 обозначены составные части МКСИК.

### МОДЕЛЬ ГРАНИЦ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИНЫ ЛАЗЕРНОГО ФАЗОВОГО ДАЛЬНОМЕРА

Расстояние, измеряемое ЛФД, может быть определено решением уравнения [10]:

$$L = K_a + \frac{Nc}{2fn} + \frac{c\Delta\varphi}{4\pi fn}, \quad (1)$$

где  $K_a$  — значение аппаратной поправки,  $N$  — целое число волн на длине трассы,  $c$  — значение скорости света в вакууме,  $f$  — значение частоты следования импульсов зондирующего сигнала,  $n$  — значение показателя

преломления воздуха на измеряемой трассе,  $\Delta\varphi$  — значение разности фаз сигналов опорного и измерительного каналов.

МКСИК предназначен для исследований процесса измерений разности координат (приращения длины линии), поэтому в дальнейшем будем рассматривать не абсолютное расстояние  $L$ , а расстояние  $L_D$  между точкой, удалённой на целое число волн  $N$  от МКСИК, и точкой размещения отражателя, исключив таким образом из рассмотрения целое число волн  $N$ .

Если принять обозначение для определения скорости света в атмосфере  $v = c/n$ , то выражение для  $L_D$  можно записать в виде

$$L_D = K_a + \frac{v\Delta\varphi}{4\pi f}. \quad (2)$$

Продифференцируем все входящие в выражение (2) измеряемые величины кроме аппаратной поправки:

$$\frac{\partial L}{\partial v} = \frac{\Delta\varphi}{4\pi f}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial f} = \frac{-v\Delta\varphi}{4\pi f^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta\varphi} = \frac{v}{4\pi f}. \quad (5)$$

Руководствуясь рекомендациями для определения результатов косвенных измерений и оценки их погрешности, приведёнными в источнике [14], а также материалами по оценке

$$\Delta L = \pm k \sqrt{\Delta_{K_a}^2 + \left(\frac{\Delta\varphi}{4\pi f}\right)^2 \Delta_v^2 + \left(\frac{-v\Delta\varphi}{4\pi f^2}\right)^2 \Delta_f^2 + \left(\frac{v}{4\pi f}\right)^2 \Delta_{\Delta\varphi}^2}, \quad (6)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от выбранной доверительной вероятности,  $\Delta_{K_a}$  — погрешность определения аппаратурной поправки,  $\Delta\varphi$  — разность фаз сигналов опорного и измерительного каналов,  $f$  — частота следования импульсов зондирующего сигнала,  $\Delta_v$  — погрешность определения значения скорости света на измеряемой атмосферной трассе,  $v$  — скорость света на измеряемой атмосферной трассе,  $\Delta_f$  — погрешность определения частоты следования импульсов зондирующего сигнала,  $\Delta_{\Delta\varphi}$  — погрешность определения разности фаз сигналов.

Данное выражение используется для оценки границ погрешности измерений длины МКСИК и имеет следующие составляющие, определяющие значение измеряемого расстояния: значение аппаратурной поправки, значение разности фаз сигналов, значение частоты следования импульсов зондирующего сигнала, значение скорости света на измеряемой трассе. Каждая составляющая имеет свою погрешность, вносящую вклад в результирующее значение погрешности измерений длины [10, 11].

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИНЫ ЛАЗЕРНЫМ ФАЗОВЫМ ДАЛЬНОМЕРОМ

С целью повышения точности измерений длины ЛФД предлагается исследовать пути уменьшения составляющих погрешности МКСИК, учитываемых в изложенной модели границ погрешности.

Для обеспечения наименьшей погрешности определения аппаратурной поправки МКСИК предлагается использовать средства из состава ГЭТ 199 ФГУП «ВНИИФТРИ». Определение аппаратурной поправки проводится на эталонном измерительном комплексе длины в диапазоне до 60 м (ЭИК) из состава ГЭТ 199 (рис. 2) [16–18].

границ погрешности измерений длины, приведёнными в источниках [10, 15], запишем выражение для оценки границ погрешности измерений длины МКСИК:

Аппаратурная поправка определяется путём сравнения длин отрезков измерительного базиса (ИБ), полученных с помощью МКСИК, с действительными значениями длин этих же отрезков, определёнными с помощью средств из состава ЭИК.

Погрешность определения аппаратурной поправки МКСИК вычисляется по формуле:

$$S_{\Delta K_j} = \sqrt{S_{M_j}^2 + S_{R_j}^2}, \quad (7)$$

где  $S_{M_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (L_{Mij} - \bar{L}_{Mj})^2}{n-1}}$  — среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений, выполненных с помощью МКСИК на  $j$ -ом отрезке ИБ;  $\bar{L}_{Mj}$  — среднее арифметическое значение результатов измерений, выполненных с помощью МКСИК на  $j$ -ом отрезке ИБ;



**Рис. 2.** Эталонный измерительный комплекс длины до 60 м на основе фемтосекундного лазера и измерительного базиса ГЭТ 199

**Fig. 2.** Reference measuring complex of up to 60 meters in length based on a femtosecond laser and a measurement basis of GET 199

$$S_{Rj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (L_{Rij} - \bar{L}_{Rj})^2}{n-1}} \quad \text{— СКО результатов}$$

измерений, выполненных с помощью средств из состава ГЭТ 199-2018 на  $j$ -ом отрезке ИБ;  $\bar{L}_{Rj}$  — среднее арифметическое значение результатов измерений, выполненных с помощью средств из состава ГЭТ 199-2018 на  $j$ -ом отрезке ИБ;  $n$  — количество измерений.

В качестве перспективных путей уменьшения погрешности определения разности фаз сигналов предлагается использовать устройство цифровой регистрации и обработки сигналов, в котором реализован метод расчёта разности фаз путём математической обработки зарегистрированных данных с помощью специально разработанного программного обеспечения на основе вычислительного алгоритма, реализующего метод Фурье. Порядок вычисления разности фаз сигналов приведён в формулах (8)–(16) [19].

При оцифровке измерительных данных периодические сигналы раскладываются в ряд спектральных составляющих (ряд Фурье), в результате чего получают дискретные спектры сигналов опорного  $s_r(k\Delta\omega)$  и измерительного  $s_m(k\Delta\omega)$  каналов:

$$S_r(k\Delta\omega) = \frac{1}{NT} \sum_{n=1}^{N-1} s_r(nT) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right), \quad (8)$$

$$S_m(k\Delta\omega) = \frac{1}{NT} \sum_{n=1}^{N-1} s_m(nT) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right), \quad (9)$$

где  $k$  — номер спектральной составляющей,  $k = 1, \dots, n$ ;  $n$  — номер отсчёта дискретизированного сигнала (целое число);  $\Delta\omega$  — спектральное разрешение;  $s_r(nT)$  — значение дискретизированного сигнала опорного канала;  $s_m(nT)$  — значение дискретизированного сигнала измерительного канала;  $T$  — интервал дискретизации;  $N$  — количество отсчётов сигнала;  $j$  — мнимая единица.

Спектральное разрешение  $\Delta\omega$  определяется по формуле:

$$\Delta\omega = \frac{F_d}{N}, \quad (10)$$

где  $F_d$  — частота дискретизации;  $N$  — размер выборки, оцифрованной осциллограммой.

Для того, чтобы определить сдвиг по фазе между двумя сигналами, принимаемыми в опорном и измерительном канале, необходимо построить на основании дискретных спектров фазовый спектр  $\varphi(k\Delta\omega)$  и амплитудный спектр  $A(k\Delta\omega)$ .

Фазовый спектр сигналов опорного  $\varphi_r(k\Delta\omega)$  и измерительного  $\varphi_m(k\Delta\omega)$  каналов определяется по формулам:

$$\begin{aligned} \varphi_r(k\Delta\omega) &= \\ &= \arg\left\{\frac{1}{NT} \sum_{n=1}^{N-1} s_r(nT) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right)\right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varphi_m(k\Delta\omega) &= \\ &= \arg\left\{\frac{1}{NT} \sum_{n=1}^{N-1} s_m(nT) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right)\right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\arg(a + jb) = b/a$ ,  $a$  — действительная часть,  $b$  — мнимая часть выражений (11) и (12).

Амплитудный спектр сигналов опорного  $A_r(k\Delta\omega)$  и измерительного  $A_m(k\Delta\omega)$  каналов определяется по формулам:

$$A_r(k\Delta\omega) = \left\{\frac{1}{NT} \sum_{n=1}^{N-1} s_r(nT) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right)\right\}, \quad (13)$$

$$A_m(k\Delta\omega) = \left\{\frac{1}{NT} \sum_{n=1}^{N-1} s_m(nT) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right)\right\}. \quad (14)$$

В амплитудном спектре сигналов опорного и измерительного каналов определяется номер гармоники  $k_{\text{mod}}$ , имеющей максимальную амплитуду, который соответствует частоте модуляции оптического сигнала  $F_{\text{mod}}$ :

$$F_{\text{mod}} = k_{\text{mod}} \Delta\omega. \quad (15)$$

Далее, в фазовых спектрах определяются амплитуды соответствующей составляющей  $k_{\text{mod}}$  и вычисляется их разность:

$$\Delta\varphi = \varphi_r(k\Delta\omega) - \varphi_m(k\Delta\omega). \quad (16)$$

Погрешность определения разности фаз сигналов определяется значением СКО результатов измерений устройства цифровой регистрации сигналов и значением неисключённой систематической погрешности результатов обработки измерений с помощью метода расчёта разности фаз на основе фурье-анализа.

С целью уменьшения погрешности определения частоты следования импульсов зондирующего сигнала МКСИК предлагается использовать в расчётах действительное значение частоты, определённое с помощью частотомера со стабилизированным кварцевым генератором. Преимуществом данного метода является учёт действительного значения частоты, а не номинального паспортного значения, конструктивно заложенного производителем при изготовлении прибора.

В качестве перспективного пути повышения точности определения скорости света на измеряемой трассе предлагается использовать метод измерений показателя преломления на двух длинах волн и разработанный на его основе рефрактометр интегральный дисперсионный (далее — рефрактометр).

Принцип действия рефрактометра состоит в измерении временного (фазового) сдвига между двумя модулированными по одинаковому закону оптическими сигналами, отличающимися друг от друга длиной оптической несущей волны, и вычислении показателя преломления с использованием метода Прилепина. Временной сдвиг возникает из-за оптической дисперсии показателя преломления воздуха, приводящей к тому, что скорость распространения оптического излучения на разных длинах волн разная, и, как следствие, разным будет время, затрачиваемое оптическим излучением на разных длинах волн на прохождение одной и той же трассы. Величина временного сдвига пропорциональна разнице показателя преломления воздуха и расстоянию, которое проходит свет на пути от рефрактометра до зеркального отражателя, установленного в удалённой точке, и обратно от отражателя до рефрактометра.

Преимуществом использования рефрактометра является возможность определения среднего значения показателя преломления воздуха по всей длине трассы методом прямых измерений, а не методом усреднения результатов косвенных измерений, проведённых в нескольких точках трассы.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МКСИК

На основании предложенных методов уменьшения погрешности МКСИК была оценена его

точность и исследовано влияние ОЛЗ на погрешность измерений длины.

С целью исследования возможности уменьшения погрешности измерений длины при использовании ОЛЗ были проведены исследования межканального дрейфа МКСИК. Для этого МКСИК был установлен в лабораторных условиях, на расстоянии 4 м от него на неподвижном оптическом столе на линейный позиционер (далее — позиционер) был закреплен отражатель. В ходе измерений, выполняемых с помощью МКСИК, ОЛЗ устанавливалась в измерительный канал, измерялась разность фаз в каналах и вычислялась поправка, необходимая для компенсации разности фаз. Затем ОЛЗ убиралась из измерительного канала и при помощи МКСИК проводились измерения перемещения отражателя, произведённого с помощью позиционера, с использованием полученных значений поправки. Далее, процесс повторялся заданное количество раз, после чего проводилось усреднение данных. Вычисления разности фаз сигналов проводились с помощью метода Фурье-анализа, далее по полученным значениям разности фаз вычислялись значения длины.

На рис. 3 приведены значения результатов измерений МКСИК с использованием ОЛЗ и без неё.

На рисунке красным цветом показано измеренное расстояние по ОЛЗ, синим цветом показано измеренное расстояние без ОЛЗ, зелёным цветом показаны измерения трассы с учётом поправок ОЛЗ.

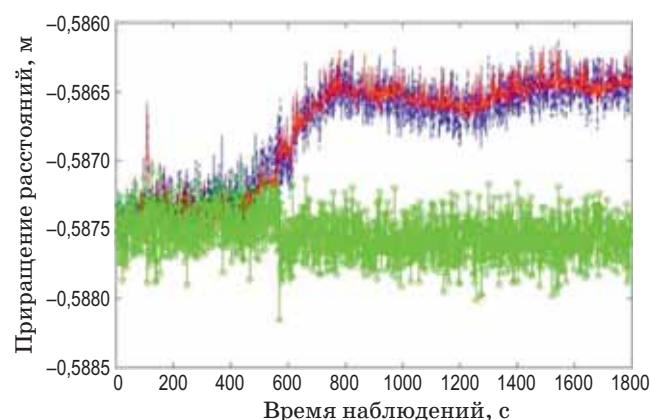


Рис 3. Результаты измерений МКСИК при использовании ОЛЗ и без неё

Fig. 3. The results of measurements of the Layout when using the delay reference line and without it

По результатам измерений был оценен межканальный дрейф, который составил приблизительно 1–2 мм на интервале 100 с и до 10 мм на часовом интервале. Внесение поправки результатов измерений ОЛЗ к измерениям по трассе подтвердили возможность компенсации межканального дрейфа до величин менее 0,1 мм. Дальнейшие исследования МКСИК выполнялись с использованием ОЛЗ.

Далее проводилась оценка случайной погрешности МКСИК, выраженной в виде СКО, при измерениях на дистанции до 3000 м. Для этого с помощью оптических светофильтров проводилась имитация потерь в атмосфере для расстояний 1000 м и 3000 м. МКСИК был установлен в лабораторных условиях, на расстоянии 4 м от него на неподвижном оптическом столе на позиционере был закреплён отражатель. Между МКСИК и отражателем устанавливался светофильтр, ослабление которого соответствует ослаблению атмосферной трассы длиной в 1000 м. Расстояние между МКСИК и отражателем изменялось с помощью позиционера, обеспечивающего перемещение отражателя на заданную величину. Измерения выполнялись с помощью МКСИК в 10 точках (рис. 4).

Далее, между МКСИК и отражателем устанавливался светофильтр, ослабление которого соответствует ослаблению атмосферной трассы длиной в 3000 м. Операции повторялись аналогичным образом.

Затем, по полученным измерительным данным, вычислялись значения разности фаз сигналов с помощью метода фурье-анализа и значения длины. Далее, оценивались значения приращений расстояний и СКО результатов измерений в каждой точке. Максимальные значения СКО результатов измерений при внесённом ослаблении, эквивалентном потерям на трассе длиной 1000 и 3000 м, составили 0,12 и 0,27 мм соответственно. Полученные значения СКО не превышают значения 0,3 мм, что показывает возможность достижения требуемой точности при условии стабильности параметров атмосферы, необходимой для проведения геодезических измерений.

Далее, проводились экспериментальные исследования по определению погрешности измерения приращения координат МКСИК на ЭИК из состава ГЭТ 199-2018. При проведении изме-

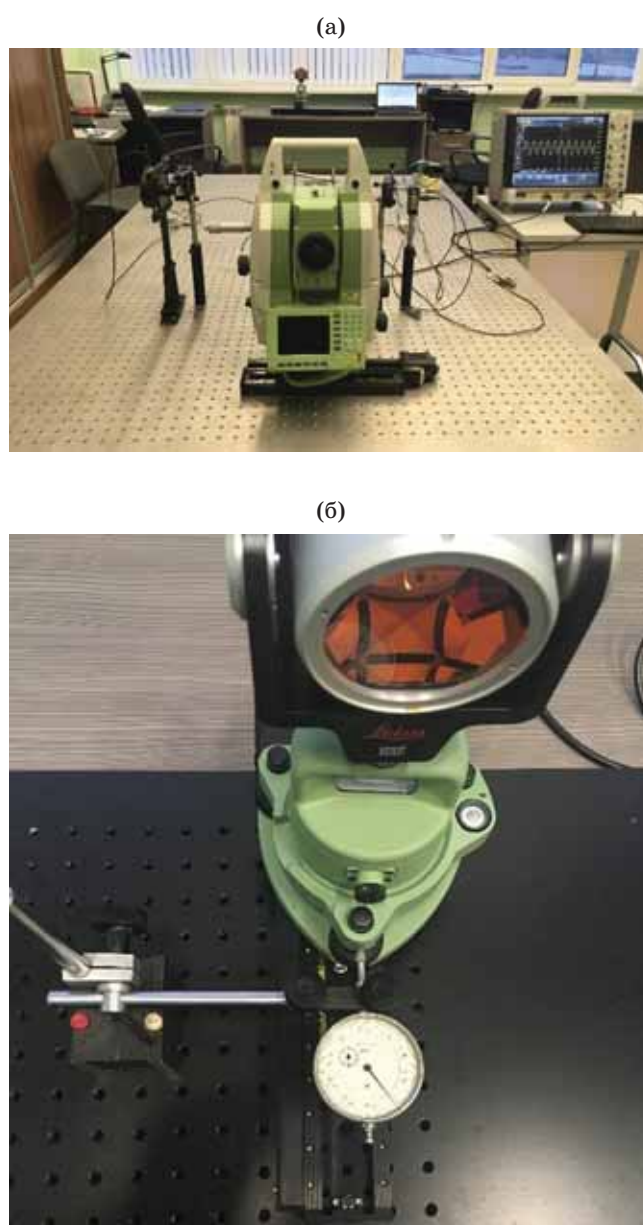


Рис. 4. Внешний вид МКСИК (а) и узла крепления отражателя (б)

Fig. 4. Appearance of the Layout (а) and the mounting unit of the reflector (б)

рений источник излучения из состава МКСИК устанавливался на оптическом столе ЭИК, а на подвижной каретке ИБ в опорной точке на расстоянии 1 м от источника излучения устанавливался отражатель. С помощью светофильтра вносилось ослабление, соответствующее оптическим потерям при распространении излучения на дистанции 3000 метров. Проводилась серия из 10 измерений с помощью МКСИК. Затем отражатель перемещался

на расстояния 20 и 50 м относительно опорной точки и проводилась серия из 10 измерений в каждой точке.

Далее, по полученным измерительным данным, вычислялись значения разности фаз сигналов с помощью метода фурье-анализа и значения длины. Затем, оценивались значения приращений расстояний и СКО результатов измерений в каждой точке. Значения СКО результатов измерений при внесённом ослаблении, эквивалентном потерям на трассе длиной 3000 м, составили 0,12 и 0,16 мм для дистанции 20 и 50 метров соответственно. Полученные результаты показали возможность измерения приращений координат на дистанции до 3000 м со значением СКО, не превышающем 0,3 мм при условии стабильности параметров атмосферы, необходимой для проведения геодезических измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены и исследованы методы повышения точности измерений длины лазерных фазовых дальномеров на дистанции до 3000 м.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов Д.А., Козаченков С.А. Абсолютный дальномер на основе фемтосекундного лазера с возможностью прослеживаемости к эталону времени и частоты // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90. № 6. С. 25–37. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-06-25-37>
2. Данилова Е.А., Кочегаров И.И., Затылкин А.В. Анализ методов лазерной дальнометрии высокой точности // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2015. Т. 1. № 4 (26). С. 154–160.
3. Рой Ю.А., Садовников М.А., Шаргородский В.Д. Российская сеть лазерной дальнометрии – основа для дальнейшего повышения точности геодезического и эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС // *Метрология времени и пространства. Доклады 6-го Международного симпозиума*. 2013. С. 284.
4. Меснянкин Е.П., Павлов Н.И., Потапов С.Л., Потапова Н.И. Аналитическая модель лазерного дальномера для измерения расстояний до объектов с плохо прогнозируемой динамикой движения // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90. № 2. С. 46–58. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-02-46-58>
5. Головков В.А., Потапова Н.И., Руденко П.Н., Страдов Б.Г. Приемная система импульсного лазерного дальномера // *Оптический журнал*. 2020. Т. 87. № 11. С. 74–80. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-11-74-80>
6. Тихонов Е.В., Маркушин Г.Н., Кошелев А.В., Векшин Ю.А., Алмазов А.А., Швалев А.В., Коротаев В.В. Параметрический лазерный дальномер с пассивной системой термостабилизации // *Оптический журнал*. 2020. Т. 87. № 11. С. 688–692. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000688>

Первый метод основан на уменьшении погрешности определения разности фаз сигналов посредством использования устройства цифровой регистрации и обработки сигналов путём вычисления разности фаз с помощью специально разработанного вычислительного алгоритма на основе фурье-анализа. Второй метод основан на учёте долговременного дрейфа разности фаз сигналов между опорным и измерительным каналами путём введения поправки, получаемой с помощью опорной оптической линии задержки.

Применимость предложенных методов подтверждена при проведении экспериментальных исследований с помощью МКСИК. Полученные результаты доказывают возможность повышения точности измерений длины ЛФД. Использование данных методов при измерениях с помощью ЛФД обеспечивает возможность проведения измерений длины с погрешностью, не превышающей значения 1,3 мм в диапазоне до 3000 м в условиях стабильности параметров атмосферы. Предложенные методы перспективны при разработке лазерных фазовых дальномеров.

## REFERENCES

1. Sokolov D., Kozachenkov S. Femtosecond laser-based absolute rangefinder with the possibility of traceability to the time and frequency standard // *Journal of Optical Technology*. 2023. V. 90. P. 302–309. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000302>
2. Danilova E.A., Kochegarov I.I., Zatytkin A.V. Analysis of high-precision laser rangefinder methods // *XXI century: Results of the past and problems of the present plus*. 2015. V. 1. № 4 (26). P. 154–160.
3. Roy Yu.A., Sadovnikov M.A., Shargorodsky V.D. The russian laser rangefinder network is the basis for further improving the accuracy of geodetic and ephemeris-temporal support of GLONASS // In the book: *Metrolology of time and space. Reports of the 6th International Symposium*. 2013. 284 p.
4. Mesnjankin E.P., Pavlov N.I., Potapov S.L., Potapova N.I. Analytical model of a laser rangefinder for measuring distances to objects with poorly predictable motion dynamics // *Journal of Optical Technology*. 2023. V. 90. P. 81–87. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000081>
5. Golovkov V.A., Potapova N.I., Rudenko P.N., Stradov B.G. Receiving system of a pulsed laser rangefinder // *Journal of Optical Technology*. 2020. V. 87. № 11. P. 688–692. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000688>
6. Tikhonov E.V., Merkushev G.N., Koshelev A.V., Vekshin Yu.A., Almazov A.A., Shvalev A.V., Korotaev V.V. Parametric laser rangefinder with a passive thermal stabilization system [in Russian] // *Opticheskiy zhurnal*. 2020. T. 87. № 11. P. 688–692. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000688>

- журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 80–92. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-80-92>
7. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ.
  8. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28.12.2023 г. № 2821 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений».
  9. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 02.02.2024 № 279 «Об утверждении Государственного первичного специального эталона единицы длины».
  10. Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радиогодезические и электрооптические измерения. Учебник для вузов. М.: Недра, 1985. 303 с.
  11. Голуб Д.А. Оценка метрологических характеристик разрабатываемого лазерного фазового дальномера с использованием модели его погрешности // VII Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» / Сборник материалов. 21 марта 2019. Менделеево, Россия. С. 18–20.
  12. Любченко Д.А., Донченко С.С. Результаты разработки и исследования отдельных узлов макета оптического фазового дальномера с субмиллиметровым разрешением // VIII Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» / Сборник материалов. 6 февраля 2020. Менделеево, Россия. С. 9–14.
  13. Новикова И.В., Мазуркевич А.В., Колмогоров О.В., Донченко С.С., Любченко Д.А. Анализ способов разрешения неоднозначности фазовых измерений, проводимых с помощью макета оптического светодальномера с субмиллиметровым разрешением // X Международный симпозиум «Метрология времени и пространства» / Сборник материалов. 6–8 октября 2021. Менделеево, Россия. С. 108–112.
  14. МИ 2083-90. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. М. 1991.
  15. Сирая Т.Н. Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 9–14. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-1-9-14>
  16. 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/ApplAstron.52.63-67>
  17. Мазуркевич А.В., Соколов Д.А., Тимофеев Е.Ю. 19 Международный конгресс метрологии CIM2019 // Научно-технический журнал «Вестник метролога». 2019. № 4. С. 28–30.
  18. Новикова И.В. Экспериментальное исследование методик определения инструментальной составляющей систематической погрешности измерений эталонного измерительного комплекса длины в диапазоне до 60 м при работе с фазовым светодальномером // Научно-технический журнал «Вестник метролога». 2023. № 1. С. 31–36.
  19. DSPL-2.0. Свободная библиотека алгоритмов цифровой обработки сигналов. [Электронный ресурс]. Дата обновления: 05.01.2022. URL: <https://ru.dsplib.org> (дата обращения: 20.06.2023).
  - Zhurnal. 2023. V. 90. № 10. P. 80–92. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-80-92>
  7. Federal Law "On ensuring the uniformity of measurements" dated 26.06.2008 № 102-FZ.
  8. Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 28.12.2023 № 2821 "On approval of the State Verification Scheme for coordinate-time measurements".
  9. Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 02.02.2024 № 279 "On approval of the State Primary Special Standard of the unit of length".
  10. Bolshakov V.D., Deimlich F., Golubev A.N., Vasiliev V.P. Radiogeodetic and electro-optical measurements. Textbook for universities. M.: Nedra, 1985. 303 p.
  11. Golub D.A. Evaluation of metrological characteristics of the laser phase rangefinder being developed using its error model // VII Scientific and practical conference of young scientists, graduate students and specialists "Metrology in the XXI century" / Collection of materials. March 21, 2019. Mendeleev, Russia. P. 18–20.
  12. Lyubchenko D.A., Donchenko S.S. Results of development and research of individual nodes of the optical phase rangefinder layout with submillimeter resolution // VIII Scientific and practical conference of young scientists, graduate students and specialists "Metrology in the XXI century" / Collection of materials. February 6, 2020. Mendeleev, Russia. P. 9–14.
  13. Novikova I.V., Mazurkevich A.V., Kolmogorov O.V., Donchenko S.S., Lyubchenko D.A. Analysis of methods for resolving ambiguity of phase measurements carried out using a model of an optical light meter with submillimeter resolution // X International Symposium "Metrology of time and space" / Collection of materials. October 6 – 8, 2021. Mendeleev, Russia. P. 108–112.
  14. MI 2083-90. Recommendation. The state system of ensuring the uniformity of measurements. Measurements are indirect. Determination of measurement results and estimation of their errors. M. 1991.
  15. Siraya T.H. Methods of data processing in measurements and metrological models // Measuring technique. 2018. № 1. P. 9–14. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-1-9-14>
  16. Sokolov D.A., Oleinik-Dziadik O.M., Silvestrov I.S. A reference measuring complex of length in the range up to 60 m from the composition of the State primary special standard of the unit of length // Proceedings of the IPA RAS. 2020. Iss. 52. P. 63–67. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.52.63-67>
  17. Mazurkevich A.V., Sokolov D.A., Timofeev E.Yu. 19 International Congress of Metrology CIM2019 // Scientific and technical journal "Bulletin of the Metrologist". 2019. № 4. P. 28–30.
  18. Novikova I.V. Experimental study of methods for determining the instrumental component of the systematic measurement error of a reference measuring complex of length in the range up to 60 m when working with a phase light meter // Scientific and Technical journal "Bulletin of Metrologist". 2023. № 1. P. 31–36.
  19. DSPL-2.0 is a free library of digital signal processing algorithms. [electronic resource]. Update date: 05.01.2022. URL: <https://ru.dsplib.org> (accessed: 06/20/2023).

**АВТОРЫ**

**Дарья Александровна Любченко** — младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 141570, Менделеево, Московская обл., Россия; <https://orcid.org/0009-0006-5228-8095>, [lubchenko@vniiftri.ru](mailto:lubchenko@vniiftri.ru)

**Олег Викторович Колмогоров** — канд. техн. наук, начальник отдела, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 141570, Менделеево, Московская обл., Россия; Scopus ID: 56600671300, <https://orcid.org/0000-0001-9051-6227>, [kolmogorov@vniiftri.ru](mailto:kolmogorov@vniiftri.ru)

*Статья поступила в редакцию 29.09.2023  
Одобрена после рецензирования 08.12.2023  
Принята к печати 29.02.2024*

**AUTHORS**

**Daria A. Lubchenko** — Junior Researcher, All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements, 141570, Mendeleevo, Moscow region, Russia; <https://orcid.org/0009-0006-5228-8095>, [lubchenko@vniiftri.ru](mailto:lubchenko@vniiftri.ru)

**Oleg V. Kolmogorov** — PhD, Head of Department, All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements, 141570, Mendeleevo, Moscow region, Russia; Scopus ID: 56600671300, <https://orcid.org/0000-0001-9051-6227>, [kolmogorov@vniiftri.ru](mailto:kolmogorov@vniiftri.ru)

*The article was submitted to the editorial office 29.09.2023  
Approved after review 08.12.2023  
Accepted for publication 29.02.2024*