

ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 006.91

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-59-70>



Лазерные фазовые дальномеры: пути повышения точности

Д. А. Любченко ✉, А. В. Мазуркевич

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»,
рабочий поселок Менделеево, Московская область, Россия
✉ lubchenko@vniiftri.ru

Аннотация: Научно-технический прогресс в сфере геодезических и промышленных измерений в части использования лазерных дальномеров, работающих в диапазонах до 5 000 метров, привел к уменьшению погрешности выше перечисленных средств измерений за последние десять лет в два и более раза. Следствием такого стремительного развития технологий высокоточной дальнометрии стал значительный пересмотр требований по их метрологическому обеспечению, а также необходимость разработки нового поколения эталонов длины, запас метрологической точности которых обеспечивал бы оценку метрологических характеристик всех типов существующих и перспективных средств измерений длины, имеющих в своем составе лазерный светодальномер.

Для решения этой задачи авторами в рамках ряда тематических научно-исследовательских опытно-конструкторских работ проводились исследования с целью разработки нового поколения эталонов длины, работающих в диапазоне до 5 000 метров, в условиях открытой атмосферы.

В данной статье рассмотрен один из разработанных макетов высокоточного комплекса средств измерений длины и приращений координат. Макет представляет собой высокоточный лазерный фазовый дальномер с доработанной системой приема и обработки измерительных сигналов. С помощью данного макета дальномера предлагается исследовать пути уменьшения составляющих его погрешности с целью повышения точности измерений длины. Для обеспечения наименьшей погрешности определения аппаратурной поправки макета дальномера могут служить средства из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины.

В качестве перспективных путей уменьшения погрешности определения разности фаз сигналов представляется возможным использовать устройства цифровой регистрации и обработки сигналов, в которых реализован метод расчета разности фаз сигналов путем математической обработки зарегистрированных данных с помощью специально разработанного вычислительного алгоритма на основе Фурье-анализа.

Наиболее точное определение значений частоты следования импульсных сигналов и значений скорости света на измеряемой трассе может быть получено благодаря использованию высокоточных средств определения данных показателей. Реализация предложенных авторами методов повышения точности измерений длины лазерных фазовых дальномеров позволяет обеспечивать необходимый запас метрологической точности.

Ключевые слова: макет, дальномер, аппаратурная поправка, разность фаз, Фурье-анализ

Используемые сокращения: ГПС – Государственная поверочная схема; ГЭТ 199–2018 – Государственный первичный специальный эталон единицы длины; МКСИК – макет высокоточного комплекса средств измерений приращений координат; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЭИК – эталонно-измерительный комплекс; ИБ – отрезок измерительного базиса; СКО – среднее квадратическое отклонение.

Ссылка при цитировании: Любченко Д. А., Мазуркевич А. В. Лазерные фазовые дальномеры: пути повышения точности // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 5. С. 59–70. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-59-70>.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023; одобрена после рецензирования 15.10.2023; принята к публикации 25.12.2023.

MEASUREMENT STANDARDS

Review article

Laser Phase Rangefinders: Ways to Improve Accuracy

Daria A. Lubchenko ✉, Andrey V. Mazurkevich

All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements (VNIIFTRI),
Moscow region, Mendeleevo, Russia
✉ lubchenko@vniiftri.ru

Abstract: Scientific and technological progress in the field of geodetic and industrial measurements in terms of the use of laser rangefinders operating in ranges up to 5000 meters has led to a reduction in the error of such measuring instruments over the past ten years by two or more times. Such rapid development of high-precision rangefinder technologies has led to a significant revision of the requirements for their metrological support, as well as to the need to develop a new generation of length standards, the stock of metrological accuracy of which would provide an assessment of the metrological characteristics of all types of existing and promising length measuring instruments with a laser rangefinder. To solve this problem, the Institute's staff conducted research within the framework of a number of thematic research and development works in terms of developing the appearance of a new generation of length standards operating in the range up to 5000 meters in an open atmosphere. Within the framework of this article, one of the developed models of a high-precision complex of measuring instruments for length and coordinate increments is considered, which is a serial high-precision laser phase light meter, modified by the institute's staff in terms of the system for receiving and processing measuring signals. At the same time, in order to increase the accuracy of length measurements using the developed range finder layout, it is proposed to investigate ways to reduce the errors of the model components of the boundaries of its error. To ensure the smallest error in determining the hardware correction of the rangefinder layout, it is proposed to use funds from the state primary special standard of the unit of length.

As promising ways to reduce the error in determining the phase difference of signals, it is proposed to use digital recording and signal processing devices that implement a method for calculating the phase difference of signals by mathematically processing the recorded data using a specially developed computational algorithm based on Fourier analysis.

For the most accurate determination of the values of the pulse repetition frequency of signals and the values of the speed of light on the measured track, it is proposed to improve the means of determining these indicators.

The use of the proposed methods to improve the accuracy of measuring the length of laser phase rangefinders allows you to provide the necessary margin of metrological accuracy.

Keywords: layout, rangefinder, hardware correction, phase difference, Fourier analysis

For citation: Lubchenko D. A., Mazurkevich A. V. Laser phase rangefinders: ways to improve accuracy. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(5):59–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-59-70>.

The article was submitted 17.07.2023; approved after reviewing 15.10.2023; accepted for publication 25.12.2023.

Введение

В настоящее время для обеспечения функционирования цифрового роботизированного производства и мониторинга, а также для проведения высокоточных измерений в геодезии и других сферах деятельности человека, где есть необходимость в атмосферных измерениях длин линий, используются средства измерений, в конструкцию которых включены лазерные

светодальномеры. Как правило, такие средства измерений работают в условиях открытой атмосферы в диапазонах измерений от единиц метров до пяти километров [1–5]. Погрешность измерений таких средств варьируется от десятых долей миллиметра до единиц миллиметров, что зависит, в первую очередь, от измерительных задач, поставленных перед каждым конкретным средством измерений, а также от диапазона измерений.

Следует признать: научно-технический прогресс в сфере дальномерных измерений не стоит на месте, и это уже привело к уменьшению погрешности атмосферных лазерных дальномеров более чем в два раза за последние десять лет [6, 7]. Такая тенденция – уменьшение погрешности – имеет устойчивый характер и объясняется развитием методов цифровой обработки измерений, достижениями современной науки в оптике и вычислительной технике, а также использованием новых технологий в лазерной дальнометрии, основанных на использовании атмосферных интерферометров [8–10].

Исходя из требований Федерального закона № 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 процедуру утверждения типа и периодическую (первичную) поверку. Для обеспечения проведения испытаний и поверки средств измерений длины применяются Государственные рабочие эталоны длины, которые в соответствии с ГПС для координатно-временных средств измерений должны проследиваться к ГЭТ 199-2018 [11, 12]. Основываясь на Приказе Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.12.2018 № 2831 и Приказе Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12.03.2018 № 447, исходя из требований ГПС, для определения погрешности средств измерений длины должно обеспечиваться соотношение погрешности эталона к исследуемому средству измерений не менее чем 1:2.

Таким образом, для метрологического обеспечения современных средств измерений длины, имеющих в своем составе светодальномеры, особенно в части высокоточных измерений длины, возникает проблема выхода на предельные значения запаса метрологической точности используемых эталонов длины, что уже с трудом обеспечивается выборкой наиболее точных серийных образцов фазовых светодальномеров на базе высокоточных тахеометров. Соответственно, на ближайшую перспективу требуется разработка узкоспециализированных дальномеров для использования в качестве эталонов длины в диапазоне до 5000 метров, которые обеспечивали бы необходимый запас метрологической точности к существующим и перспективным средствам измерений длины геодезического и промышленного назначения. Предполагаемые требования точности разрабатываемых эталонов на таких дистанциях, представленные в виде погрешности измерений длины, должны составлять значения не более 1,3 миллиметра.

Статья посвящена проблеме повышения точности измерений длины с помощью лазерного светодальномера.

Целями данной статьи является (1) исследование путей повышения точности измерений длины с помощью разработанного МКСИК, представляющего собой высокоточный лазерный фазовый светодальномер, и (2) уменьшение составляющих его погрешности.

В задачи исследования входит следующее: выявление составляющих, определяющих значение измеряемого расстояния МКСИК; определение модели границ погрешности измерений длины МКСИК; формирование и исследование путей уменьшения погрешностей составляющих модели границ погрешности МКСИК; выбор высокоточных средств для определения аппаратурной поправки дальномера; использование устройств цифровой регистрации сигналов и реализация метода расчета разности фаз путем математической обработки данных; выбор метода обработки измерительных данных с помощью Фурье-анализа; выбор средств для определения частоты следования лазерных импульсов и значенной скорости света на измеряемой трассе.

Материалы и методы

Возможность измерения расстояний при помощи электромагнитных волн основана на зависимости проходимого волной пути от времени его прохождения. За некоторый конечный интервал времени электромагнитная волна пройдет конечное расстояние, для определения которого необходимо измерить интервал времени и знать скорость распространения волны. Измерительный процесс сводится к измерению времени. Так как скорость электромагнитных волн очень велика, это время чрезвычайно мало даже при больших расстояниях. Столь малые временные интервалы требуются измерять с очень высокой точностью, чтобы получить удовлетворяющую геодезическим требованиям точность измерения расстояния.

Для достижения такой точности необходимы специальные методы измерений. К настоящему времени разработано несколько таких методов, различающихся по техническим принципам. Этими методами измеряют либо непосредственно временной интервал, либо другой параметр, являющийся определенной функцией этого интервала. В зависимости от конкретного метода реализуется та или иная схема измерения расстояний, определяющая соответствующую функциональную схему построения измерительной аппаратуры.

Существуют следующие основные методы измерения расстояний: импульсный (временной) метод, частотный метод, фазовый метод на частоте модуляции,

фазовый метод на несущей частоте (интерференционный метод), комбинированный метод (импульсно-фазовый метод) [13].

Фазовый метод измерений расстояний

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 измерений длины. Поэтому, основываясь на большом опыте его реализации на практике, представляется целесообразным найти пути уменьшения погрешности измерений длины при измерениях фазовым методом.

При реализации лазерного фазового дальномера фазовый метод измерений расстояний предполагает измерения разности фаз между опорным сигналом и сигналом, прошедшим измеряемую трассу в прямом и обратном направлении, и последующем расчете значений длины на основе данных о частоте следования лазерных импульсов и скорости их распространения на трассе [14–16].

Макет высокоточного комплекса средств измерений приращений координат

Для исследования путей повышения точности измерений длины фазовым методом разработан МКСИК, обобщенная схема которого приведена на рис. 1.

На схеме в качестве источника лазерного излучения используется высокоточный электронный тахеометр (далее – тахеометр). Излучаемые сигналы (лазерные импульсы) с тахеометра поступают на светоделительный кубик, который разделяет их на два канала – опорный и измерительный. Сигнал опорного канала

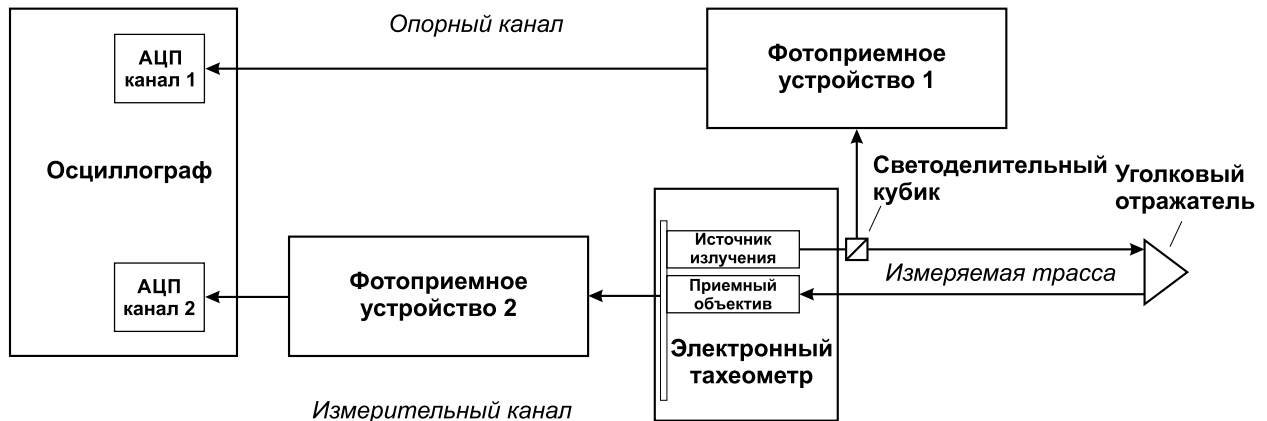


Рис. 1. Обобщенная схема макета высокоточного комплекса средств измерений приращений координат [14]
 Fig. 1. Generalized diagram of the layout of a high-precision set of instruments for measuring coordinate increments [14]

поступает на фотоприемное устройство 1, а затем – в АЦП канала 1 осциллографа. Сигнал измерительного канала проходит по измеряемой трассе на уголкового отражателя, отражаясь от которого, идет на фотоприемное устройство 2 и далее поступает в АЦП канала 2 осциллографа. Осциллограф используется для регистрации сигналов опорного и измерительного каналов и последующего расчета значений разности фаз и длины [14, 15].

Внешний вид МКСИК приведен на рис. 2.

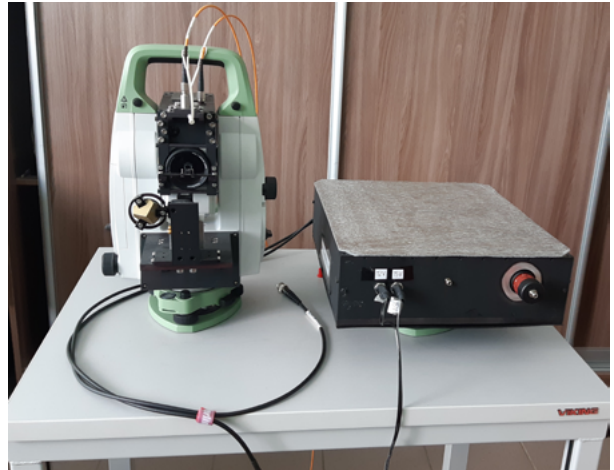


Рис. 2. Внешний вид макета высокоточного комплекса средств измерений приращений координат
 Fig. 2. Appearance of the layout of a high-precision set of instruments for measuring coordinate increments

Расстояние, измеряемое МКСИК, может быть определено решением уравнения

$$L = K_{\text{амт.}} + \frac{N \cdot c}{2 \cdot f \cdot n} + \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4 \cdot f \cdot \pi \cdot n}, \quad (1)$$

где K_{ann} – значение аппаратной поправки; N – целое число волн; c – значение скорости света в вакууме; f – значение частоты следования импульсного сигнала; n – значение показателя преломления воздуха на измеряемой трассе; $\Delta\varphi$ – значение разности фаз сигналов опорного и измерительного каналов.

По результатам анализа выражения (1) выявлены составляющие, определяющие значение измеряемого расстояния МКСИК: значение аппаратной поправки, значение разности фаз сигналов, значение частоты следования импульсного сигнала, значение скорости света на измеряемой трассе. Каждая составляющая имеет свою погрешность, вносящую вклад в результирующее значение погрешности измерений длины [14].

Модель границ погрешности измерений длины лазерного фазового дальномера

Руководствуясь рекомендациями для определения результатов косвенных измерений и оценке их погрешности, приведенными в МИ 2083–90, а также материалами по оценке границ погрешности измерений длины в соответствии с РМГ 29–2013 и [14, 17, 18], определена модель границ погрешности измерений длины лазерных фазовых дальномеров:

$$\Delta L = \pm k \cdot \sqrt{\Delta_k^2 + \left(\frac{v}{4\pi f}\right)^2 \cdot \delta_\varphi^2 + L^2 \cdot [\delta_f^2 + \delta_v^2]}, \quad (2)$$

где k – коэффициент, зависящий от выбранной доверительной вероятности; Δ_k – погрешность определения аппаратной поправки; v – скорость света на измеряемой трассе; f – значение частоты следования импульсного сигнала; δ_φ – погрешность определения разности фаз сигналов; L – длина измеряемой трассы; δ_f – погрешность определения частоты модуляции сигналов; δ_v – погрешность определения значения скорости света на измеряемой трассе.

Данное выражение используется для оценки границ погрешности измерений длины МКСИК. С целью повышения точности измерений длины МКСИК были исследованы пути уменьшения погрешностей составляющих модели границ погрешности МКСИК.

Погрешность определения аппаратной поправки

Для обеспечения наименьшей погрешности определения аппаратной поправки МКСИК применяли средства из состава ГЭТ 199–2018 [19].

Определение аппаратной поправки проводили на ЭИК длины в диапазоне до 60 метров из состава

ГЭТ 199–2018 путем сравнения длин отрезков ИБ, полученных с помощью МКСИК, с действительными значениями длин этих же отрезков, определенных с помощью средств из состава ЭИК (рис. 3).



Рис. 3. Эталонный измерительный комплекс длины до 60 метров на основе фемтосекундного лазера и измерительного базиса ГЭТ 199–2018 [12]

Fig.3. Reference measuring complex with a length of up to 60 meters based on a femtosecond laser and the GET 199–2018 measuring basis [12]

При проведении измерений тахеометр из состава МКСИК устанавливали на оптическом столе ЭИК, а на подвижной каретке ИБ устанавливали отражатель. Расстояние от места установки тахеометра до начальной позиции установки отражателя (D_0) определяли в соответствии с методикой [19]. Измерения выполняли на отрезках ИБ, имеющих номинальные значения, не превышающие 2, 24, 30 и 60 метров. Измерения проводили на каждом отрезке не менее 30 раз. Одновременно выполняли измерения действительных значений длин этих же отрезков ИБ с помощью средств из состава ГЭТ 199–2018.

Значение аппаратной поправки на j -ых отрезках ИБ вычисляли по формуле

$$K_j = \overline{L_j} - \overline{L_{действj}}, \quad (3)$$

где $\overline{L_j}$ – среднее арифметическое значение длины, полученное с помощью тахеометра из состава МКСИК на j -ом отрезке ИБ; $\overline{L_{действj}}$ – среднее арифметическое действительное значение длины, полученное с помощью средств из состава ГЭТ 199–2018 на j -ом отрезке ИБ.

Значением аппаратной поправки K МКСИК считается среднее значение K_j .

Погрешность определения аппаратной поправки ΔK МКСИК характеризовали суммарным значением среднего квадратического отклонения (далее – СКО) результатов измерений, выполненных с помощью МКСИК

и с помощью средств из состава ГЭТ 199–2018 и вычисляли по формуле

$$S_{\Delta k_j} = \sqrt{S_{\text{МКСИК}_j}^2 + S_{\text{ЭТ},j}^2}, \quad (4)$$

где $S_{\text{МКСИК}_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=\text{МКСИК}_j=1}^n (L_{i\text{МКСИК}_j} - \overline{L_{i\text{МКСИК}_j}})^2}{n-1}}$ –

СКО результатов измерений, выполненных с помощью МКСИК на j -ом отрезке ИБ;

$$S_{\text{ЭТ},j} = \sqrt{\frac{\sum_{i\text{ЭТ},j=1}^n (L_{i\text{ЭТ},j} - \overline{L_{i\text{ЭТ},j}})^2}{n-1}}$$
 – СКО резуль-

татов измерений, выполненных с помощью средств из состава ГЭТ 199–2018 на j -ом отрезке ИБ;

n – количество измерений.

Значением СКО определения аппаратурной поправки считали среднее значение $S_{\Delta k_j}$.

Таким образом, СКО определения аппаратурной поправки по результатам измерений и расчетов составило 0,015 мм.

С вероятностью 95 % (2σ) НСП определения аппаратурной поправки по результатам измерений и расчетов не превысило значения 0,03 мм.

Погрешность определения разности фаз сигналов

В качестве перспективных путей уменьшения погрешности определения разности фаз сигналов предлагаем использовать устройства цифровой регистрации и обработки сигналов, в которых реализован метод расчета разности фаз сигналов путем математической обработки зарегистрированных данных с помощью специально разработанного вычислительного алгоритма на основе Фурье-анализа. Руководствуясь вычислительными данными, приведенными в свободной библиотеке алгоритмов цифровой обработки сигналов – DSPL-2.0, был разработан вычислительный алгоритм расчета разности фаз сигналов. Он приведен в формулах (5–12).

При оцифровке измерительных данных периодический сигнал раскладывается в ряд спектральных составляющих (ряд Фурье), в результате чего получается дискретный спектр сигнала опорного $S_{\text{ОП.}}(k\Delta\omega)$ и измерительного $S_{\text{ИЗМ.}}(k\Delta\omega)$ каналов:

$$S_{\text{ОП.}}(k\Delta\omega) = \frac{1}{N \cdot T} \cdot \sum_{n=1}^{N-1} S_{\text{ОП.}}(n \cdot T) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right), \quad (5)$$

$$S_{\text{ИЗМ.}}(k\Delta\omega) = \frac{1}{N \cdot T} \cdot \sum_{n=1}^{N-1} S_{\text{ИЗМ.}}(n \cdot T) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right), \quad (6)$$

где k – номер спектральной составляющей $k = 1 \dots n$; $\Delta\omega$ – спектральное разрешение; n – целое число; T – интервал дискретизации; N – члены ряда Фурье; j – мнимая единица; N – размер выборки оцифрованной осциллограммой;

$$\Delta\omega = \frac{F_d}{N},$$

где F_d – частота дискретизации.

Фазовый спектр сигналов опорного $\varphi_{\text{ОП.}}(k\Delta\omega)$ и измерительного $\varphi_{\text{ИЗМ.}}(k\Delta\omega)$ каналов определяется по формулам:

$$\varphi_{\text{ОП.}}(k\Delta\omega) = \text{Arg}\left(\frac{1}{N \cdot T} \cdot \sum_{n=1}^{N-1} S_{\text{ОП.}}(n \cdot T) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right)\right), \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{ИЗМ.}}(k\Delta\omega) = \text{Arg}\left(\frac{1}{N \cdot T} \cdot \sum_{n=1}^{N-1} S_{\text{ИЗМ.}}(n \cdot T) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right)\right). \quad (8)$$

Амплитудный спектр сигналов опорного $A_{\text{ОП.}}(k\Delta\omega)$ и измерительного $A_{\text{ИЗМ.}}(k\Delta\omega)$ каналов определяется по формулам:

$$A_{\text{ОП.}}(k\Delta\omega) = \text{Arg}\left(\frac{1}{N \cdot T} \cdot \sum_{n=1}^{N-1} S_{\text{ОП.}}(n \cdot T) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right)\right), \quad (9)$$

$$A_{\text{ИЗМ.}}(k\Delta\omega) = \text{Arg}\left(\frac{1}{N \cdot T} \cdot \sum_{n=1}^{N-1} S_{\text{ИЗМ.}}(n \cdot T) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right)\right). \quad (10)$$

Далее находили глобальный максимум (максимальный отсчет) k_{mod} в амплитудном спектре сигналов, который соответствует частоте модуляции оптического сигнала F_{mod} :

$$F_{\text{mod}} = k_{\text{mod}} \cdot \Delta\omega. \quad (11)$$

После этого номер отсчета k_{mod} подставляли в фазовый спектр опорного и измерительного сигналов:

$$\Delta\varphi = \varphi_{ОП.}(k\Delta\omega) - \varphi_{ИЗМ.}(k\Delta\omega). \quad (12)$$

Погрешность определения разности фаз сигналов характеризуется значением СКО результатов измерений устройства цифровой регистрации сигналов.

Значение СКО результатов измерений устройства цифровой регистрации сигналов зависит от погрешности измерения интервалов времени между опорным и зондирующим сигналами осциллографа из состава МКСИК.

Погрешность измерения разности фаз сигналов в опорном и измерительном канале осциллографа определяется по формуле:

$$\delta_{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{A_{rms}}{S_r}\right)^2 + \theta_{ОСЦ}^2}, \quad (13)$$

где A_{rms} – уровень шума измеряемого сигнала; S_r – скорость нарастания переднего фронта; $\theta_{ОСЦ}$ – джиттер внутреннего запускающего сигнала осциллографа.

Погрешность определения разности фаз сигналов с учетом усреднения на интервале 1 с вычисляется по формуле

$$\delta_{\varphi} = \frac{\delta_{\varphi} \cdot 2\pi}{T \sqrt{N_{ИЗМ}}}, \quad (14)$$

где T – период следования импульсов тахеометра; $N_{ИЗМ}$ – количество измерений за интервал усреднения.

Значения СКО результатов измерений устройства цифровой регистрации сигналов для различных дистанций приведены в табл. 1.

Одним из преимуществ данного метода является доступность его использования: метод может быть реализован в серийно выпускаемых дальнометрах, т. к. не требует значительных затрат и специальной аппаратуры. Другим преимуществом данного метода является его точность: метод обработки измерительных

данных с помощью Фурье-анализа позволяет обеспечить меньшее значение СКО результата измерений, чем значения, полученные при расчете с помощью других методов обработки.

Погрешность определения частоты следования импульсного сигнала

Обычно при проведении измерений используется паспортное значение частоты следования импульсного сигнала, конструктивно заложенное производителем при изготовлении прибора.

С целью уменьшения погрешности МКСИК предлагается использовать в расчетах действительное значение частоты, определенное с помощью частотомера со стабилизированным кварцевым генератором Keysight 53230A (далее – частотомера).

Погрешность определения действительных значений частоты следования импульсного сигнала характеризуется погрешностью устройства ее определения.

СКО измерений частоты частотомера составляет значение $\pm 1 \cdot 10^{-11}$.

НСП измерений частоты частотомера составляет значение $\pm 1 \cdot 10^{-8}$.

Погрешность определения скорости света на измеряемой трассе

Значение скорости света на измеряемой трассе характеризуется значением скорости света в вакууме и значением среднего вдоль трассы показателя преломления воздуха; описывается выражением

$$v = \frac{c}{n}, \quad (15)$$

где v – значение скорости света в воздухе; c – значение скорости света в вакууме; n – показатель преломления воздуха.

Каждая составляющая выражения (15) имеет свои погрешности [20].

Погрешностью определения скорости света в вакууме можно пренебречь из-за ее малого значения. В качестве перспективного пути повышения точности

Таблица 1. Погрешность определения разности фаз сигналов на различных дистанциях

Table 1. Error in determining the phase difference of signals at various distances

№ п/п	Измеряемая дистанция, км	Значение, рад
1	1	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$
2	3	$\pm 2 \cdot 10^{-7}$
3	5	$\pm 4 \cdot 10^{-7}$

определения скорости света на измеряемой трассе предлагается использовать рефрактометр интегральный дисперсионный (далее – рефрактометр) для определения данного показателя.

Принцип действия рефрактометра состоит в (а) измерении временного (фазового) сдвига между двумя модулированными по одинаковому закону оптическими сигналами, отличающимися друг от друга длиной оптической несущей волны, (б) вычислении показателя преломления. 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 удаленной точке, и обратно от отражателя до рефрактометра.

Повышение точности определения показателя преломления воздуха достигается за счет его определения методом прямых измерений.

НСП измерений показателя преломления воздуха вдоль трассы распространения лазерного излучения рефрактометра составляет значение $\pm 1 \cdot 10^{-8}$.

Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены результирующие значения погрешностей составляющих выражения для оценки погрешности измерений длины МКСИК, полученных с помощью вышеприведенных методов.

Полученные результаты подтверждают применимость предложенных методов уменьшения составляющих погрешности измерений длины лазерных фазовых дальномеров.

Использование предложенных методов позволяет уменьшить погрешность измерений длины до значительного порядка 1 миллиметра в диапазоне до 5 километров.

Заключение

По результатам проведенных исследований разработаны методы уменьшения составляющих погрешности макета лазерного фазового дальномера, позволяющие повысить точность его измерений. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

Таблица 2. Бюджет погрешности макета высокоточного комплекса средств измерений приращений координат

Table 2. Error budget of the layout of a high-precision set of instruments for measuring coordinate increments

Наименование составляющей погрешности измерений длины	Значение погрешности
Абсолютная погрешность определения аппаратурной поправки, мм: – значение СКО – значение НСП (по уровню вероятности 0,95)	$\pm 0,015$ $\pm 0,03$
Абсолютная погрешность определения разности фаз сигналов, рад: – значение СКО на дистанциях: 1 000 м 3 000 м 5 000 м	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$ $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ $\pm 4 \cdot 10^{-7}$
Относительная погрешность определения частоты следования импульсного сигнала: – значение СКО – значение НСП (по уровню вероятности 0,95)	$\pm 2 \cdot 10^{-11}$ $\pm 2 \cdot 10^{-8}$
Относительная погрешность определения значения скорости света на измеряемой трассе: – значение НСП (по уровню вероятности 0,95)	$\pm 10^{-7}$
Доверительные границы погрешности измерений длины МКСИК, м: – на дистанциях: 1 000 м 3 000 м 5 000 м	$\pm 6 \cdot 10^{-4}$ $\pm 8 \cdot 10^{-4}$ $\pm 1 \cdot 10^{-3}$

1) выявлены составляющие, определяющие значение измеряемого расстояния МКСИК;

2) определена модель границ погрешности измерений длины МКСИК;

3) сформированы и исследованы пути уменьшения погрешностей составляющих модели границ погрешности МКСИК:

а) выбраны высокоточные средства для наиболее точного определения аппаратурной поправки дальномера;

б) предложено использование устройств цифровой регистрации сигналов и реализация метода расчета разности фаз путем математической обработки данных, зарегистрированных с помощью этих устройств;

в) выбран метод обработки измерительных данных с помощью Фурье-анализа (данный метод позволяет обеспечить меньшее значение погрешности определения разности фаз сигналов, чем значения, получаемые при расчете с помощью других методов);

г) выбраны средства для определения частоты следования лазерных импульсов и значений скорости света на измеряемой трассе.

В результате проведенных исследований была подтверждена возможность доработки высокоточного лазерного фазового дальномера с целью уменьшения его погрешности.

Теоретическая значимость исследований обусловлена подтверждением возможности использования усовершенствованных алгоритмов обработки измерительных сигналов для уменьшения погрешности измерений длины лазерных фазовых дальномеров. Первым промежуточным итогом проведенных исследований разработанного МКСИК можно считать уменьшение погрешности измерений длины на 10–15 %.

Практическая значимость исследований состоит в том, что с помощью полученных результатов возможна дальнейшая разработка эталонов единицы длины с погрешностью, не превышающей значений 1,3 миллиметра в диапазоне измерений до 5000 метров.

Благодарности: Исследования выполнены в рамках опытно-конструкторской работы, проводимой во ФГУП «ВНИИФТРИ». Все измерения проводились с использованием оборудования ФГУП «ВНИИФТРИ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитическая модель лазерного дальномера для измерения расстояний до объектов с плохо прогнозируемой динамикой движения / Е. П. Меснянкин [и др.] // Оптический журнал. 2023. Т. 90, № 2. С. 46–58. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-02-46-58>
2. Буренин А. В. Исследование особенностей распространения низкочастотных псевдослучайных сигналов для задач акустической дальнометрии подводных объектов : спец. 01.04.06 Акустика: автореферат дис. ...

Acknowledgments: The research was carried out as part of the development work carried out at the All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements. All measurements were carried out using the equipment of the All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements.

Вклад соавторов: Любченко Д. А.— разработка методов уменьшения погрешностей составляющих модели границ его погрешности лазерного фазового дальномера, проведение исследовательских работ, включающих сбор и анализ экспериментальных данных; написание текста статьи по полученным результатам; Мазуркевич А. В.— общее руководство исследованиями; сбор литературных данных; проверка и редактирование текста статьи.

Author Contributions: Lubchenko D. A.— development of methods for reducing errors of the components of the model of the boundaries of its error of a laser phase rangefinder; conducting research including the collection and analysis of experimental data, writing the text of the article based on the results obtained; Mazurkevich A. V.— general management of research, collection of literary data, revision and editing of the text of the article.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с содержанием настоящей статьи. Материал статьи подготовлен на основе доклада, представленного на II Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «За нами будущее» (г. Екатеринбург, 14–16 июня 2023 года). Материал статьи допущен к публикации после доработки материалов тезисов доклада, оформления статьи и проведения процедуры рецензирования.

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest. The material of the article was prepared on the basis of the report presented at the II All-Russian Scientific-Practical Conference of Young Scientists and Specialists «Future is for us» (Yekaterinburg, June 14–16, 2023). The article was approved for publication after finalizing the abstract of the report, designing the article and conducting the review procedure.

- кандидата физико-математических наук : / А. В. Буренин; Тихоокеан. океанол. ин-т ДВО РАН. Владивосток, 2013. 24 с. URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01005542525> (дата обращения: 15.05.2022).
3. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии / Ю. Н. Моргунов [и др.] // *Акустический журнал*. 2018. Т. 64, № 2. С. 191–196. <https://doi.org/10.7868/S0320791918020120>
 4. Руссо П. Дальнометрия малоразмерных целей с большой дальностью действия: пат. RU2640399 С2, заявл. 18.10.2013; опубл. 09.01.2018. Бюл. № 1.
 5. Урваев И. Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2021. № 1 (35). С. 44–51. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2021-1-5>
 6. 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, Менделеево, 17–19 сентября 2012 года*. Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2013. С. 284
 7. Игнатенко И. Ю. Перспективы создания эталонного комплекса спутниковой лазерной дальнометрии // *Метрология времени и пространства: материалы VII Международного симпозиума, Суздаль, 17–19 сентября 2014 года / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии; Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений*. Суздаль: ФГУП ВНИИФТРИ, 2014. С. 207–208.
 8. Цыба Е. Н., Вострухов Н. А. Совершенствование средств обработки данных измерений лазерной дальнометрии ИСЗ и Луны в ГМЦ ГСВЧ // *Труды института прикладной астрономии РАН*. 2018. № 45. С. 120–123. <https://doi.org/10.32876/AppIAstron.45.120-123>
 9. 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.
 10. Садовников М. А. Необходимые условия достижения субмиллиметровой точности измерений в спутниковой лазерной дальнометрии // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2009. Т. 14, № 12. С. 13–16.
 11. 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 в диапазоне 24 м – 4000 км (ГПСЭД) // *Труды ИПА РАН*. 2020. № 52. С. 63–67. <https://doi.org/10.32876/AppIAstron.52.63-67>
 12. Мазуркевич А. В., Соколов Д. А., Тимофеев Е. Ю. 19-й Международный конгресс метрологии SIM2019 // *Вестник метролога*. 2019. № 4. С. 28–30.
 13. Радиогеодезические и электрооптические измерения: учебник для вузов / В. Д. Большаков [и др.]. М.: Недра, 1985. 303 с.
 14. Голуб Д. А., Колмогоров О. В. Оценка метрологических характеристик разрабатываемого лазерного фазового дальнометра с использованием модели его погрешности // *Метрология в XXI веке: материалы VII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов*, Менделеево, 21 марта 2019 года. Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2019. С. 18–20.
 15. Любченко Д. А., Донченко С. С. Результаты разработки и исследования отдельных узлов макета оптического фазового дальнометра с субмиллиметровым разрешением // *Метрология в XXI веке: материалы VIII Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов*, Менделеево, 06 февраля 2020 года. Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2021. С. 9–14.
 16. Анализ способов разрешения неоднозначности фазовых измерений, проводимых с помощью макета оптического светодальнометра с субмиллиметровым разрешением / И. В. Новикова [и др.] // *Метрология времени и пространства: материалы X Международного симпозиума*, Менделеево, 06–08 октября 2021 года. Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2021. С. 108–112.
 17. Сирая Т. Н. Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели // *Измерительная техника*. 2018. № 1. С. 9–14.
 18. Rabinovich S. G. *Measurement errors and uncertainties: theory and practice*. New York: Springer-Verlag, 2005. 308 p. <https://doi.org/10.1007/0-387-29143-1>
 19. 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 светодальнометром // *Вестник метролога*. 2023. № 1. С. 32–36.
 20. Вшивкова О. В. *Физика Земли и атмосферы. Влияние атмосферы на результаты геодезических измерений: учебное пособие*. М.: МИИГАиК, 2017.

REFERENCE

1. Mesnjankin N. I., Pavlov E. P., Potapov S. L., Potapova N. I. Analytical model of a laser rangefinder for measuring distances to objects with poorly predicted motion dynamics. *Opticheskii Zhurnal*. 2023;90(2):46–58. (In Russ.). <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-02-46-58>
2. Burenin A. V. *Study of the features of the propagation of low-frequency pseudo-random signals for problems of acoustic ranging of underwater objects*. Dissertation. POI FEB RAS; 2013. (In Russ.).
3. Morgunov Y. N., Bezotvetnykh V. V., Burenin A. V., Voitenko E. A., Golov A. A. Experimental testing of high-accuracy underwater range-finding technology. *Acoustical Physics*. 2018;64(2):190–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0320791918020120>

4. Russo P. Ranging of small targets with long range. Patent RF, no. 2640399 C2, 2018. (In Russ.).
5. Urvaev I. N. Mobile robot navigation based on laser range methods. *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:44–51. (In Russ.).
6. Roy Yu. A., Sadovnikov M. A., Shargorodsky V. D. Russian laser ranging network – the basis for further increasing the accuracy of geodetic and ephemeris-time support of GLONASS. In: *Metrology of time and space: Collection of works 6th International Symposium*, 17–19 September 2012, Mendeleevo, Russia. Mendeleevo: VNIIFTRI; 2013. p. 284. (In Russ.).
7. Ignatenko I. Yu. Prospects for creating a reference complex for satellite laser ranging. In: *Metrology of time and space: Collection of works VII International Symposium*, 17–19 September 2014, Suzdal, Russia. Mendeleevo: VNIIFTRI; 2014. pp. 207–208. (In Russ.).
8. Tsyba E. N., Vostruhov N. A. Improvements in the MMC SSTF Tools to Analyze the LLR and SLR Observations. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS.* 2018;45:120–123. (In Russ.). [https://doi.org/10.32876/AppIAstron.45.120–123](https://doi.org/10.32876/AppIAstron.45.120-123)
9. Grigoriev A. V., Kochegarov I. I., Zatytkin A. V. Analysis by laser ranging high accuracy. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus.* 2015;1(4):154–160. (In Russ.).
10. Sadovnikov M. A. Necessary conditions for achieving submillimeter measurement accuracy in satellite laser ranging. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems.* 2009;14(12):13–16. (In Russ.).
11. Sokolov D. A., Oleinik-Dzyadik O. M., Silvestrov I. S. A standard measuring complex for length in the range of up to 60 m from the State Primary Special Standard of a Unit of Length in the range of 24 m – 4 000 km (GPSED). *Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences.* 2020;52:63–67. (In Russ.).
12. Mazurkevich A. V., Sokolov D. A., Timofeev E. Yu. 19th International Congress of Metrology CIM2019. *Metrologist's Bulletin.* 2019;(4):28–30. (In Russ.).
13. Bolshakov V. D., Deimlich F., Golubev A. N., Vasiliev V. P. Radio geodetic and electro-optical measurements: textbook for universities. Moscow: Nedra; 1985. 303 p. (In Russ.).
14. Golub D. A., Kolmogorov O. V. Assessment of the metrological characteristics of the developed laser phase range finder using its error model. In: *Metrology in the 21st Century: Proceedings of the VII Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Graduate Students and Specialists*, 21 March 2019, Mendeleevo. Mendeleevo: VNIIFTRI; 2019. pp. 18–20. (In Russ.).
15. Lyubchenko D. A., Donchenko S. S. Results of the development and research of individual components of a prototype of an optical phase range finder with submillimeter resolution. In: *Metrology in the 21st Century: Materials of the VIII Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Graduate Students and Specialists*, 06 February 2020, Mendeleevo. Mendeleevo: VNIIFTRI; 2021. pp. 9–14. (In Russ.).
16. Novikova I. V., Mazurkevich A. V., Kolmogorov O. V., Donchenko S. S., Lyubchenko D. A. Analysis of methods for resolving the ambiguity of phase measurements carried out using a prototype of an optical range finder with submillimeter resolution. In: *Metrology of Time and Space: Proceedings of the X International Symposium*, 06–08 October 2021, Mendeleevo. Mendeleevo: VNIIFTRI; 2021. pp. 108–112. (In Russ.).
17. Siraya T. N. Methods of Data Processing in Measurements and Metrological Models. *Measurement Techniques.* 2018;(1):9–14. (In Russ.).
18. Rabinovich S. G. Measurement errors and uncertainties: theory and practice. New York: Springer-Verlag; 2005. 308 p. (In Russ.).
19. Novikova I. V. Experimental investigation of methods for determining the instrumental component of the systematic error of measurements of the reference measuring complex of length in the range of up to 60 m when working with a phase light detector. *Vestnik Metrologa.* 2023;(1):32–36. (In Russ.).
20. Vshivkova O. V. Physics of the Earth and atmosphere. The influence of the atmosphere on the results of geodetic measurements: textbook. Moscow: MIIGAiK; 2017. (In Russ.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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).

ГЭТ 199-2018 Государственный первичный специальный эталон единицы длины: институт-хранитель ФГУП «ВНИИФТРИ» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397885>

МИ 2083–90 Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерения и оценивание их погрешностей. М.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1991.

Об обеспечении единства измерений: Федер. закон Рос. Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собрания Рос. Федерации 11 июня 2008 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 18 июня 2008 г. (в редакции от 11 июня 2021 г. № 170-ФЗ) // Официальный интернет-портал правовой информации [сайт]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102122832>

Об утверждении Государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2018 г. № 2831 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : официальный сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553849932>

Об утверждении Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199–2018: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 марта 2018 г. № 447 // Портал ГАРАНТ.РУ : официальный сайт. URL: <https://base.garant.ru/71900290/>

РМГ 29–2013. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения=State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. М.: Стандартиформ, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Любченко Дарья Александровна – младший научный сотрудник ФГУП «ВНИИФТРИ»

Россия, 141570, Московская область, рабочий поселок Менделеево
e-mail: lubchenko@vniiftri.ru

Мазуркевич Андрей Владимирович – начальник отдела метрологического обеспечения геодезических измерений, ФГУП «ВНИИФТРИ»

Россия, 141570, Московская область, рабочий поселок Менделеево
e-mail: avm@vniiftri.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Daria A. Lubchenko – Junior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements

Moscow region, Mendeleevo, 141570, Russia

e-mail: lubchenko@vniiftri.ru

Andrey V. Mazurkevich – Head of the Department of Metrological Support of Geodetic Measurements, All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements

Moscow region, Mendeleevo, 141570, Russia

e-mail: avm@vniiftri.ru