

УДК 681.78:621.373.826

Универсальный стенд для бестрассовой проверки импульсных лазерных дальномеров

© 2019 г. **А. В. Нужин***, канд. техн. наук; **А. В. Ильинский**;
И. П. Полякова, канд. техн. наук; **Ю. А. Горемыкин**;
Л. Г. Евсикова, канд. техн. наук; **И. И. Баздров**; **С. А. Смирнов**

*АО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения», г. Сосновый Бор Ленинградской обл.
АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

E-mail: yug-goi@mail.ru, nuzhin@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-06-71-76

Приведено описание стенда для бестрассовой проверки лазерных импульсных дальномеров. Стенд позволяет моделировать измерение дальности до объектов в широком диапазоне, проверять параллельность осей каналов дальномера, контролировать энергию и форму импульса излучения лазера на длине волны 1,06 и 1,54 мкм. Приведена оценка точностных характеристик стенда.

Ключевые слова: импульсный лазерный дальномер, длина волны лазерного излучения, бестрассовый контроль, визуализатор лазерного излучения, мерный временной интервал.

Коды OCIS: 120.4640, 140.3460.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием лазерной дальнометрии [1, 2] возникает необходимость в создании единой установки для контроля основных параметров лазерного дальномера: дальности действия, мощности излучения лазера, параллельности осей каналов дальномера. В настоящее время существует большое количество установок для контроля энергетических параметров дальномера [3], параллельности осей визирного и приёмного каналов [4] или визирного и передающего каналов [5], или всех трёх каналов дальномера [6]. Проверка дальности действия дальномера осуществляется преимущественно в полевых условиях на трассе по мишеням, установленным на выверенных расстояниях. Нам известна всего одна установка для бестрассовой проверки дальности действия дальномера и параллельности осей его каналов [7].

В АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» разработан и изготовлен макетный образец универсального стенда для бестрассовой проверки лазерных импульсных дальномеров, позволяющего проводить проверку дальности действия, энергии излучения лазера и параллельности осей визирного и передающего каналов дальномера, как малогабаритного, так и крупногабаритного, для двух наиболее

часто используемых длин волн излучения лазера 1,06 и 1,54 мкм. Новизна стенда защищена патентом [8].

НАЗНАЧЕНИЕ И ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Универсальный стенд для проверки импульсных лазерных дальномеров предназначен для проведения различного типа испытаний и в первую очередь для бестрассового контроля этих дальномеров в режиме измерения дальности в лабораторных условиях. Стенд может использоваться для настройки и калибровки дальномеров, оценки точности углового согласования каналов дальномера, в нём предусмотрена также возможность контроля энергии, формы импульса и частоты повторения импульсов лазера передающего канала и измерения формы импульса передающего канала.

Стенд позволяет проводить проверки дальномеров с разными габаритными размерами апертур передающего и приёмного объективов от минимальных (диаметр выходного пучка излучения 30 мм) до крупногабаритных (диаметр выходного пучка излучения 80 мм, диаметр приёмного канала 200 мм).

При проверке дальномеров стенд обеспечивает следующие параметры:

- диапазон имитируемых дальностей — от 50 до 20000 м;
- погрешность имитируемой дальности — ± 1 м;
- погрешность контроля параллельности осей каналов дальномера — 10 угл. сек.
- рабочие длины волн излучения — 1,06; 1,54 мкм;
- режим работы одиночными импульсами с интервалом следования импульсов не менее 1 с, а так же сериями импульсов с тактовой частотой до 100 Гц;
- длительность импульса — (10–30) нс (три фиксированные длительности импульсов под конкретные типы проверяемых дальномеров).

Схема расположения и взаимосвязи основных узлов и компонентов стенда представлена на рис. 1, макет стенда — на рис. 2.

Универсальный стенд для проверки лазерных дальномеров содержит:

- внеосевое параболическое зеркало 1 с фокусным расстоянием 1530 мм, световым диаметром 300 мм и внеосевым параметром 266 мм;
- фокальный узел 2, предназначенный для контроля параллельности осей дальномерных каналов;
- канал анализа лазерного излучения 3, обеспечивающий измерение энергии, оценку формы импульса излучения лазера проверяемого дальномера;
- персональный компьютер 4, измеритель энергии лазерного излучения 5, осциллограф 6, блоки питания 7, 8.

В свою очередь фокальный узел 2 содержит визуализатор лазерного излучения 9, установленный в фокальной плоскости параболического зеркала, две плоскопараллельные пластины со светоделительным покрытием 10, 11, и переключающееся зеркало 12, которые обеспечивают прохождение

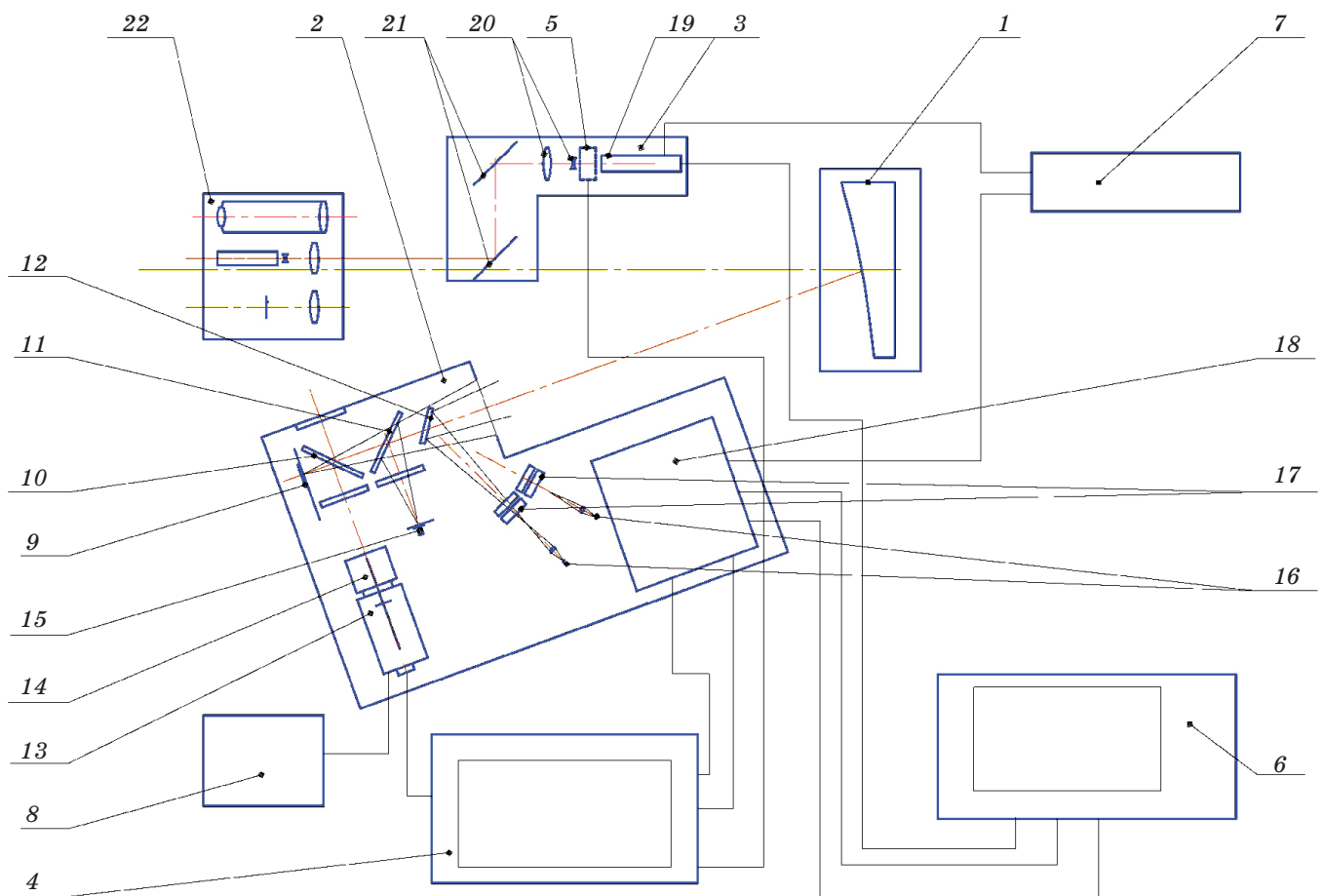


Рис. 1. Схема расположения и взаимосвязи основных узлов и компонентов стенда. 1 — внеосевое параболическое зеркало, 2 — фокальный узел, 3 — канал анализа лазерного излучения, 4 — персональный компьютер, 5 — измеритель энергии лазерного излучения, 6 — осциллограф, 7, 8 — блоки питания, 9 — визуализатор лазерного излучения, 10, 11 — плоскопараллельные пластины со светоделительным покрытием, 12 — переключающееся зеркало, 13 — телевизионная камера, 14 — объектив, 15 — светодиод с диафрагмой, 16 — лазерные диоды с формирующими системами, 17 — калиброванные на длинах волн λ_1 и λ_2 оптические ослабители лазерного излучения, 18 — цифровая плата, 19 — блок фотоприёмников с ослабителями, 20 — телескопическая система, уменьшающая рабочий диаметр лазерного пучка, 21 — зеркальный шарнир, 22 — проверяемый дальномер.

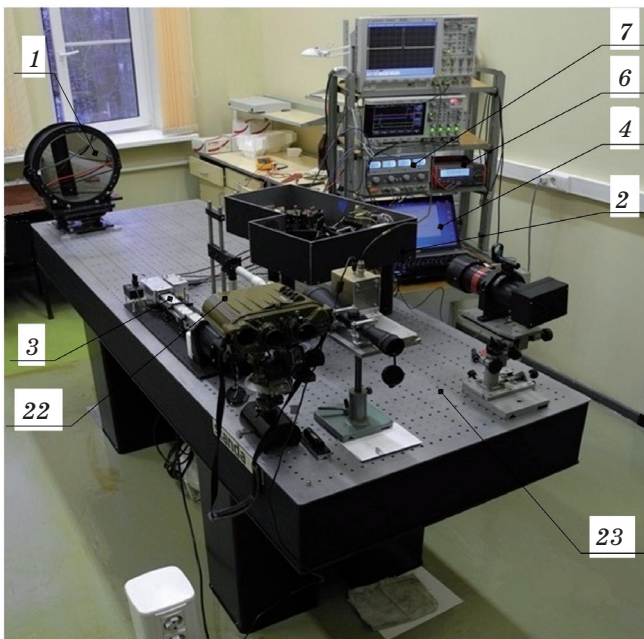


Рис. 2. Макет стенда. 1 — внеосевое параболическое зеркало, 2 — фокальный узел, 3 — канал анализа лазерного излучения, 4 — персональный компьютер, 6 — осциллограф, 7 — блок питания, 22 — проверяемый дальномер, 23 — оптическая плита.

излучения в приёмном, визирном и передающем каналах. В приёмном канале установлена телевизионная камера 13, сопряженная с персональным компьютером 4 и визуализатором 9 посредством объектива 14. Визирный канал содержит светодиод с диафрагмой 15, установленной в фокальной плоскости параболического зеркала. В приёмном канале установлены два лазерных диода 16 с формирующими системами и калиброванными оптическими ослабителями лазерного излучения 17, обеспечивающими различную степень ослабления мощности излучения лазерных диодов на рабочих длинах волн. Пластины 10, 11 наклонены на угол 45° к оптическим осям рабочих пучков, переключающееся зеркало 12 отклоняется на угол 20° или 30° от вертикали к оптической оси рабочего пучка лучей в зависимости от рабочей длины волны проверяемого дальномера 22. При работе стенда с визирным или передающим каналом проверяемого дальномера переключающееся зеркало 12 выводится из хода рабочего пучка лучей. В фокальном узле размещена также цифровая плата 18 (плата Altera Cyclone II EP2C20F484C7N FPGA), сопряженная с лазерными диодами 16 и персональным компьютером 4. С персонального компьютера осуществляется задание исходных данных в программу имитации дальности, записанную на цифровую плату.

Канал анализа лазерного излучения 3 содержит:

- блок фотоприемников с ослабителями 19, соединённый с блоком питания 7 и с осциллографом 6;

- телескопическую систему 20, уменьшающую рабочий диаметр лазерного пучка проверяемого дальномера;

- зеркальный шарнир 21, состоящий из двух взаимно-параллельных зеркал, одно из которых вводится в лазерный пучок дальномера при работе канала.

При измерении энергии излучения лазера проверяемого дальномера между блоком фотоприёмников 19 и телескопической системой 20 устанавливается измеритель энергии лазерного излучения 5.

Параболическое зеркало 1, фокальный узел 2 и канал анализа лазерного излучения 3 размещают на оптической плите 23 (рис. 2) и крепят с помощью специальных винтов. Для согласования оптических осей установки и определения оптической оси параболического зеркала используется автоколлиматор, который является вспомогательным устройством и не приведён на рис. 2. При юстировке определяется положение осевой фокальной точки параболического зеркала и последующая установка фокального узла по отношению к этой точке. Для этого конструкция параболического зеркала имеет за пределами входного окна плоский зеркальный участок, представляющий собой полукруг диаметром 25,4 мм. Плоскость участка перпендикулярна оптической оси параболы с точностью 10 угл. сек и является основным опорным элементом для юстировки каналов стенда.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РАБОТА СТЕНДА

Установка дальномера на стенд в соответствии с рис. 1 сопровождается визуальным наведением дальномера на диафрагму 15, подсвечиваемую светодиодом и имитирующую бесконечно удалённый объект с угловым размером 2 угл. мин.

После наведения проводится контроль всех основных параметров дальномера.

Для контроля параллельности осей каналов дальномера определяется пространственное положение оси передающего канала. Лазерное излучение дальномера поступает на внеосевое параболическое зеркало и, отразившись от него и пройдя сквозь пластины со спектроразделительным покрытием 10, 11, фокусируется в плоскости визуализатора 9. Визуализатор преобразует лазерное излучение проверяемого дальномера в излучение видимого диапазона, которое с помощью пластины со спектроразделительным покрытием 10 и объектива 14 подаётся на телевизионную камеру 13, сопряжённую с персональным компьютером. По оригинальной программе на персональном компьютере вычисляются координаты энергетического центра изображения, сфокусированного в плоскости визуализатора лазерного пятна, оцениваются его размеры и соответствующая им расходимость

лазерного излучения. Все результаты записываются в файл измерений.

Для измерения энергии в импульсе лазера проверяемого дальномера используется пироэлектрический измерительный преобразователь лазерного излучения Ophir PE25-C, сопряжённый с персональным компьютером. Проверка длительности импульса выходного излучения стенда выполняется с помощью быстродействующего фотоприёмного устройства, входящего в стенд, высокочастотного осциллографа и фотодиода ЛФД-2 (постоянная времени по паспорту 300 пс) в паре с быстродействующим операционным усилителем AD8001, с выхода которого сигнал поступает на вход осциллографа. Значение энергии импульса и его длительности впоследствии используются для расчёта и задания параметров импульса от лазерного диода, имитирующего отражённый от объекта импульс.

Проверка дальномера в режиме измерения дальности осуществляется путём задания временного интервала между импульсом излучения лазера проверяемого дальномера и импульсом от лазерного диода 16, имитирующим входящий в дальномер отражённый от объекта сигнал. Импульс излучения лазера проверяемого дальномера через зеркальный шарнир поступает в блок фотоприёмников 19 с ослабителями и не может попасть обратно на вход приёмной части дальномера.

Мерный временной интервал вырабатывает цифровая плата 18, входящая в состав фокального узла 2. В качестве «старт-импульса», по которому начинается отсчёт мерного интервала, на плату подаётся сигнал от блока фотоприёмников 19. В момент окончания мерного интервала цифровая плата вырабатывает сигнал, по которому вырабатывается импульс излучения лазерного диода 16. Задержки сигнала в электрических цепях стенда учитываются как поправка к величине мерного интервала, которая определяется экспериментально при калибровке стенда. Плотность энергии имитирующего импульса в плоскости входного зрачка приёмной части проверяемого дальномера должна быть близкой к той, которая приходит в дальномер в натуральных условиях. К стенду прилагается отдельный программный модуль, который позволяет вычислить это значение. Для вычислений задаётся измеренное значение энергии в импульсе лазера дальномера, его расходимость, дальность до объекта, коэффициент отражения поверхности объекта, метеорологическая дальность видимости атмосферы. По результатам расчётов в схему стенда вводится требуемая комбинация ослабителей излучения рабочего лазерного диода. Величину мерного интервала на стенде можно изменять с дискретностью, соответствующей изменению дальности до объекта на один метр, а также можно выбрать режим, при котором формируется два импульса, имитирующих случай отражения лазерного излучения от двух

объектов, расположенных на разных дальностях от дальномера. Имитируемое на стенде значение дальности следует сравнить с показаниями дальности проверяемого дальномера. Разница показаний характеризует приборную погрешность проверяемого дальномера при измерении дальности.

КАЛИБРОВКА СТЕНДА В ЧАСТИ ЗАДАВАЕМЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Для проведения аттестации стенда разработана «Методика первичной (периодической) аттестации стенда для проверки дальномеров».

Наибольший интерес при аттестации стенда представляет рассмотренная ниже проверка длительности задаваемых на стенде временных интервалов между излучаемым импульсом испытываемого дальномера и импульсом, имитирующим отражённый от цели импульс.

Настройка стенда и последующая первичная аттестация в части формирования временного интервала должна учитывать время прохождения лазерного излучения между элементами стенда и временные задержки, обусловленные временами срабатывания электронных узлов стенда. Так, необходимо учитывать задержку «старт-импульса», формируемого стендом, задержку срабатывания лазерного диода, имитирующего отражённый сигнал и время прохождения импульса от лазерного диода до входа в дальномер внутри стенда.

Решение этой задачи было выполнено с использованием дополнительного внешнего фотоприёмника в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.

Схема построена таким образом, что излучение, выходящее из импульсного лазерного передающего канала дальномера 1, делится на две ча-

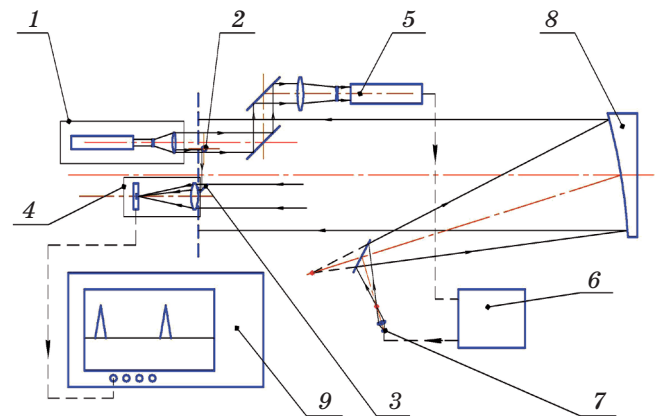


Рис. 3. Схема проверки стенда в части формирования требуемого временного интервала. 1 — импульсный лазер дальномера, 2 — малогабаритный рассеиватель, 3 — отражательный элемент, 4 — внешний фотоприёмник, 5 — блок фотоприёмников стенда, 6 — цифровая плата, 7 — лазерный диод, 8 — внеосевое параболическое зеркало, 9 — осциллограф.

сти. Одна малая часть, пройдя базовую плоскость (на рис. 3 обозначена пунктиром), практически сразу через малогабаритный рассеиватель 2 и отражательный элемент 3 попадает во внешний фотоприёмник 4. Другая, бóльшая часть, попадает в блок фотоприёмников стенда 5, где формируется «старт-импульс» для запуска цифровой платы (формирователя мерного временного интервала) 6. Цифровая плата через временной интервал выдаёт импульс на лазерный диод 7, излучение которого через внеосевое параболическое зеркало 8 попадает на внешний фотоприёмник 4. В итоге на осциллографе 9 регистрируются оба импульса — от лазерного излучателя и от лазерного диода. Временной интервал между импульсами должен соответствовать дальности, которая вводится с портативного компьютера, управляющего цифровой платой. На стадии настройки стенда поправка к временному интервалу между импульсами однократно устанавливается путём уменьшения числа счётных импульсов с формирователя временного интервала на суммарное время всех задержек в элементах стенда. Временная задержка, вносимая внешним фотоприёмником 4, при измерениях не учитывается, так как она одинакова как для «старт-импульса», так и для «стоп-импульса» от лазерного диода.

Стенд позволяет установить значение минимальной имитируемой дальности, равной 40 м, которой должен соответствовать временной интервал между импульсами 266,7 нс. При незначительных (до 20%) отличиях в амплитуде и длительности импульсов временной интервал между ними при настройке стенда оценивался с помощью осциллографа Agilent DSOX3034A. Предельное значение случайной составляющей погрешности при оценке не превысило 2 нс, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к стенду и позволяет проводить подобные измерения при аттестации стенда.

ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕНДА

Высокая точность измерения дальности обеспечивается благодаря тому, что формирование временного мерного интервала обеспечивает цифровая плата, в состав которой входит высокочастотный тактовый генератор. Оценка погрешности задания дальности сводится к оценке погрешности в части обеспечения имитации требуемой дальности L до объекта, которая определяется по формуле

$$L = \frac{ct_m}{2}, \quad (1)$$

где c — скорость света, t_m — время прохождения импульса лазерного излучения от дальномера до объекта и обратно.

Из формулы (1), перейдя к погрешностям, получим

$$\Delta L = \frac{c\Delta t_m}{2}, \quad (2)$$

где ΔL — погрешность задания имитируемой дальности устройствами стенда, Δt_m — погрешность задания устройствами стенда мерного интервала между импульсами.

Основной вклад в погрешность составляет погрешность измерения мерного интервала между зарегистрированными с помощью внешнего фотоприёмника на осциллографе импульсами от лазера и от лазерного диода, имитирующего отражённый от цели сигнал. При незначительных (до 20%) отличиях в амплитуде и длительности импульсов мерный интервал между ними может быть оценен с помощью осциллографа с погрешностью Δt_1 , не превышающей 2 нс, т.е. $\Delta t_1 = 2 \times 10^{-9}$ с. Для тактового генератора цифровой платы частота колебаний измеряется с относительной погрешностью $1,5 \times 10^{-7}$. Это значение является слабовлияющей величиной, которой можно пренебречь, но при этом следует учесть погрешность дискретизации мерного интервала, задаваемого тактовым генератором. Тактовый генератор запускается «старт-импульсом», приходящим на вход генератора в случайные моменты времени. Длительность одного такта составляет 6,6 нс. Считая момент запуска генератора случайной величиной, равномерно распределённой в интервале (0–6,6) нс, примем, что для проведения оценок значение стандартного отклонения погрешности дискретизации равно $\Delta t_2 = (6,6 - 0) / 2\sqrt{3} = 2,3$ нс = $2,3 \times 10^{-9}$ с.

В итоге, для оценки погрешности формула (2) примет вид

$$\Delta L = \frac{c\sqrt{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2}}{2},$$

при указанных выше $\Delta t_1 = 2 \times 10^{-9}$ с, $\Delta t_2 = 2,3 \times 10^{-9}$ с и скорости света $c = 3 \times 10^8$ м/с окончательно получаем $\Delta L \approx 0,6$ м. Принимая во внимание, что стенд имитирует дальности от 50 до 20000 м, относительная погрешность задания имитируемой дальности устройствами стенда составляет всего (1,5–0,003)%, что является незначительной величиной.

При проверке согласования осей дальномера стенд позволяет измерять угловую ориентацию оси лазерного пучка с угловой погрешностью до 5 угл. сек. Погрешность обеспечивается за счёт регистрации координат изображений лазерного пятна в плоскости визуализатора с погрешностью не более 0,04 мм, которой в свою очередь соответствует погрешность 8 мкм в плоскости матрицы ПЗС. Следует отметить, что основной вклад в величину погрешности вносят флуктуации освещённости в анализируемом лазерном пятне, и дальнейшее уменьшение погрешности за счёт изменения параметров анализирующей системы стенда является малоэффективным.

Погрешность измерения энергии импульса излучения проверяемого дальномера определяется

погрешностью измерителя энергии лазерного излучения. В стенде применён измеритель энергии лазерного излучения РЕ25-С, погрешность измерения которого составляет $\pm 3\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный в АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» «Универсальный стенд для проверки импульсных лазерных дальномеров» позволяет

– в лабораторных условиях проводить проверку измерения дальности лазерных дальномеров

в диапазоне от 50 до 20000 м с высокой точностью $\pm 0,6$ м,

– работать как с малогабаритными, так и с крупногабаритными дальномерами на двух наиболее часто используемых длинах волн лазерного излучения 1,06 и 1,54 мкм,

– измерять энергию и форму импульса излучения лазера передающего канала,

– обеспечивать проверку параллельности осей визирного и излучающего каналов с погрешностью до 10 угл. сек.

Новизна стенда защищена патентом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Балашов И.Ф.* Энергетическая оптика импульсных лазерных дальномеров. СПб: ГИТМО (ТУ), 1999. 35 с.
2. *Ермаков Б.А.* Оптико-электронные приборы с лазерами. Л.: ГОИ, 1982. 200 с.
3. *Горбачевская О.Р., Лях А.В., Сидоренко Н.Т., Тареев А.М., Топленникова Т.В.* Имитатор дистанций для лазерного дальномера // Патент России на полезную модель № 102815. 2010.
4. *Бауло Л.П., Бондаренко М.М., Зайцева Е.И., Мазаник Г.Н., Прудникова Т.П., Тареев А.М.* Устройство для контроля лазерного дальномера // Патент России на полезную модель № 114363. 2011.
5. *Тареев А.М., Горбачевская О.Р., Ермолович Ж.Ф., Поконечный З.И.* Устройство для контроля лазерного дальномера // Патент России на полезную модель № 81798. 2008.
6. *Тареев А.М., Сидоренко Н.Т., Лях А.В., Назаренко С.И., Дмитрущенко О.А.* Устройство для контроля лазерного дальномера // Патент России № 2246710. 2003.
7. *Кощавцев Н.Ф., Колесник А.В., Турунтаев И.В., Шустов Н.М.* Установка для бестрассовой проверки лазерного дальномера // Патент России № 2541677. 2013.
8. *Нужин А.В., Ильинский А.В., Полякова И.П., Горемыкин Ю.А., Евсикова Л.Г., Баздров И.И., Смирнов С.А., Чижов С.А., Кувалдин Э.В.* Универсальная установка для проверки лазерного дальномера // Патент России № 2678259. 2019.