

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 531.748

## ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НЕПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ – “ЛАЗЕРНАЯ СТРУНА”

© 2012 г. Г. В. Леонтьева, канд. техн. наук; Л. В. Пинаев; А. Г. Серегин

Научно-производственная корпорация “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

Научно-техническое предприятие “Градан”, Санкт-Петербург

E-mail: <optics@gradan.spb.ru>

Представлено описание нового высокоточного лазерного измерительного прибора для контроля формы и взаимного расположения поверхностей крупногабаритных изделий протяженностью до 100 м и более. В приборе создана стабильная отсчетная база, не зависящая от положения оси диаграммы направленности излучения лазера. Путем интерференционного преобразования лазерного излучения была получена концентрическая кольцевая структура пучка, сохраняющая стабильное положение относительно оси, вдоль которой распространяется излучение, что позволило осуществить непосредственную привязку приемных отсчетных устройств к оси лазерного пучка без предварительной обработки изображения. Приведены технические характеристики прибора, его отличительные особенности.

*Ключевые слова:* аксикон, пентапризма, непрямолинейность.

Коды OCIS: 120.4630, 120.0280

*Поступила в редакцию 11.07.2012*

Лазерный измеритель непрямолинейности – “Лазерная струна” является принципиально новым [1], прецизионным измерительным прибором, предназначенным для контроля формы и взаимного расположения поверхностей крупногабаритных изделий на всех стадиях их изготовления, монтажа, разметки, сборки и эксплуатации.

В свое время для этих целей были разработаны и выпускались серийно высокоточные измерительные оптические приборы. К таким приборам относятся известные разработки Государственного оптического института им. С.И. Вавилова: “Оптическая струна” и ее модификации, “Оптическая линейка”, Оптический плоскомер, а также прибор ЛОМО – визирная труба ППС-11.

Основным недостатком указанных приборов является ограничение рабочего расстояния. В этих приборах, основанных на визирном методе, точность контроля зависит от дальности контролируемой трассы. С увеличением расстояния погрешность измерения увеличивается.

Например, в визирных трубах типа ППС погрешность измерения составляет  $(10 \pm 5L)$  мкм, в “Оптических струнах” –  $(4 \pm 2L)$  мкм, где  $L$  – длина контролируемой трассы. Применение в “Оптической струне” объектива-аксикона, который, как известно [2], обладает свойством создавать на оптической оси длинный непрерывный ряд изображений источника света независимо от расстояния от источника до объектива, что позволяет повысить точность измерений из-за отсутствия фокусировки, но не увеличивает дальность контролируемой трассы. Поэтому максимальное рабочее расстояние этих приборов ограничено 30 м.

В современных технологиях пространственного контроля сложных крупногабаритных объектов на больших расстояниях эффективно использование лазерных оптических приборов. Лазерный пучок обладает большой протяженностью (сотни метров), поэтому для увеличения измерительной трассы целесообразно его применение. Однако в поперечном сечении он имеет неоднородную и непостоянную струк-

туру, что исключает возможность привязки к нему как к высокоточной отсчетной базе или направлению. Преодоление этого фактора позволило бы устранить основные недостатки лазерных измерительных приборов при построении точного отсчетного направления для контроля протяженных объектов. Создание стабильного базового направления является одной из важнейших задач лазерных измерительных приборов.

В измерителе непрямолинейности “Лазерная струна” эта проблема решается использованием в оптической системе стабилизации опорного направления в качестве объектива аксикона. Аксикон – специальный оптический элемент, обладающий большой сферической aberrацией, и благодаря этому изображение источника строится резким без перефокусировки на всех дистанциях измерения. В Лазерной струне аксикон – это положительный мениск с двумя сферическими поверхностями [3], обладающий, как упоминалось выше, свойством изображать точечный источник света в виде прямой, лежащей на оптической оси. Лучи, выходящие из источника света под одним и тем же углом к оптической оси, одинаково преломляются аксиконом и сходятся на оптической оси в одной точке, а идущие под другим углом также сходятся в одной точке оптической оси, но на другом расстоянии от аксикона. Таким образом, аксикон строит изображение без всякой фокусировки на всей длине контролируемой трассы. Вследствие таких свойств аксикона и большой пространственной и временной когерентности лазерного излучения происходит интерференционное преобразование лазерного пучка.

В результате после прохождения лазерных пучков через аксикон образуется изображение в виде концентрической кольцевой структуры с центральным ярким пятном. Кольцевая структура остается симметричной на всей контролируемой трассе и сохраняет свое положение относительно оси, вдоль которой распространяется лазерное излучение, а геометрический или энергетический центр кольцевой структуры можно принять за отсчетную ось. Таким образом, создается надежная и стабильная отсчетная база для измерения непрямолинейности на больших расстояниях (до 100 м и более).

Следует отметить, что такое преобразование лазерного пучка позволяет осуществить непосредственную привязку приемных отсчетных

устройств к оси пучка без предварительной обработки изображения. Этот факт является существенным отличием Лазерной струны от применяемых для решения подобных задач лазерных интерферометров, например таких как Лазерный интерферометр XL-80 (RENISHAW, Великобритания), Система измерительная лазерная (FIXTURLASER, Швеция) и др., в которых искомые контролируемые параметры выдаются после обработки первичной информации, представляющей собой систему интерференционных полос. Еще одним недостатком интерференционных приборов является исчезновение информации в интерферометре в процессе измерений при случайном перекрытии лазерного пучка.

Разработанный и использованный в приборе “Лазерная струна” метод стабилизации лазерного пучка лучей позволяет сохранить информацию о положении контролируемого изделия или объекта даже при случайном перекрытии пучка. Кроме того, перекрыв лазерный пучок простым экраном, мы получим на нем видимое изображение преобразованного пучка, что даст предварительную информацию о положении объекта. А это обеспечивает простоту и наглядность процесса контроля на всей трассе.

На рис. 1 показана принципиальная схема измерителя непрямолинейности “Лазерная струна”, где 1 – лазер, 2 – оптическая система преобразования лазерного излучения, включающая расширитель лазерного пучка 3 и объектив – аксикон 4, телекамера 5 с приемником 6 подключены к блоку 7, обеспечивающему управление параметрами телекамеры. Телекамера преобразует сигналы приемника в цифровой видеосигнал и передает его в вычислительный блок 8. Последний пересылает сигналы в блок отображения информации 9, который выводит изображение кольцевой структуры на свой экран (на экран дисплея прибора или в компьютер).

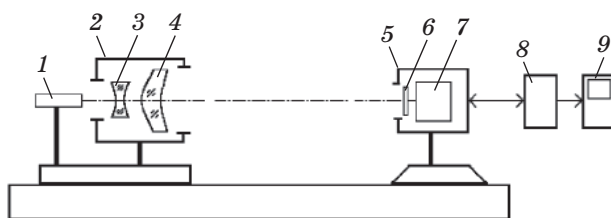
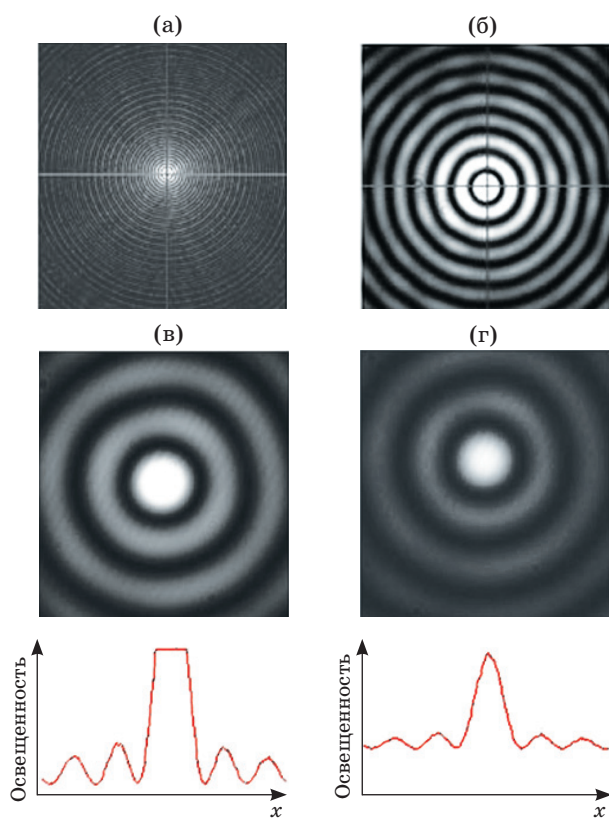


Рис. 1. Принципиальная схема лазерного измерителя непрямолинейности “Лазерная струна”. Описание в тексте.

В зависимости от положения плоскости наблюдения кольцевой структуры вдоль трассы частота кольцевых структур меняется. Изображения кольцевых структур в разных плоскостях трассы приведены на рис. 2. Вблизи оптической системы частота полос наибольшая (рис. 2а), в средней части трассы частота полос уменьшается (рис. 2б), в конце трассы наблюдается наименьшая частота полос (рис. 2в). Освещенность центральной части кольцевой структуры имеет разные значения вдоль трассы. Так на рис. 2в приведен пример насыщения сигнала в центре. В связи с этим для повышения точности измерения положения центра распределения освещенности в концентрической картине предлагается изменять коэффициент преобразования оптического сигнала в электрический до такой степени, чтобы выходной сигнал телекамеры, соответствующий центральной зоне, был меньше макси-



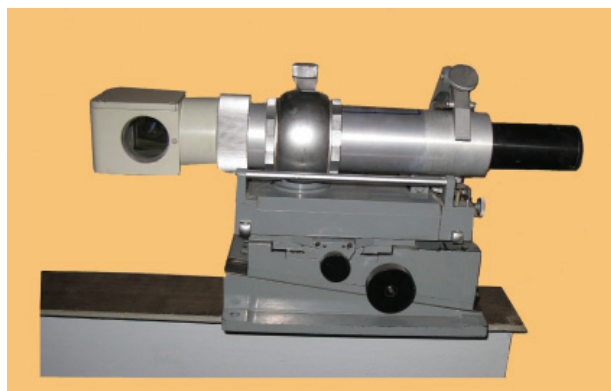
**Рис. 2.** Кольцевые структуры в разных плоскостях наблюдения вдоль трассы. Изображения картин распределения освещенности в начале трассы (а) и в середине трассы (б). Изображения картин распределения освещенности и их графиков без коррекции коэффициента преобразования видеосигнала (в) и с коррекцией коэффициента преобразования видеосигнала (г) в конце трассы.

мально возможного уровня и больше некоторого оптимального уровня (рис. 2г). Этого можно добиться за счет изменения коэффициента усиления или экспозиции телекамеры.

Полученное изображение преобразованного лазерного пучка можно непосредственно наблюдать и получать информацию с помощью оптического приемника, например, окуляра с сеткой или проекционного экрана. Возможность осуществлять контроль положения и установки объектов с достаточной точностью визуальным способом является одним из достоинств Лазерной струны.

Использованная в Лазерной струне система преобразования лазерного пучка обладает еще важным достоинством: при случайных линейных и угловых смещениях оси лазерного излучения форма и положение центрального круглого пятна кольцевой структуры остаются неизменными, что позволяет уменьшить влияние температурного градиента на точность измерений.

Измеритель состоит из трех основных блоков: лазерной трубки, содержащей лазер с оптической системой, приемника и измерительного блока (визуального или с компьютером). На рис. 3 приведена фотография общего вида Лазерной струны. Прибор расположен на подъемном столе на лафете, обеспечивающем линейные и угловые подвижки. Лазер, блок питания и оптические элементы смонтированы в цилиндрическом корпусе лазерной трубки диаметром 64 мм (диаметр измерительных труб, применяемых в технологической оснастке многих предприятий). Кроме этого, в комплекте прибора имеется лазерная трубка с посадочным диаметром 50 мм. Прибор может



**Рис. 3.** Общий вид измерителя “Лазерная струна” с пентапризменной насадкой.

располагаться на магнитном лафете, теодолитном столике или непосредственно в базовом отверстии контролируемого объекта. Лазерную трубку и приемник можно устанавливать непосредственно в отверстие контролируемого изделия или в специальные подставки. На рис. 4 представлена фотография подставки с лазерной трубкой диаметром 50 мм. Подставки снабжены магнитными основаниями и микрометрическими винтами перемещений в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При визуальных измерениях отсчетными устройствами могут быть микрометрические винты подставок с ценой деления  $10^{-2}$  мм или оптический микрометр с ценой деления  $10^{-3}$  мм. На рис. 5 показана фотография подставки с визуальным приемником.

Измеритель “Лазерная струна” может комплектоваться разнообразной периферийной оснасткой, расширяющей возможности прибора, повышающей его универсальность, в число которой входят автоколлимационная и клиновидная насадки, выносное плоское зеркало, выносное угловое зеркало, насадка с пентапризмой, накладной уровень.

Лазерный измеритель непрямолинейности может быть выполнен с автоматической стабилизацией преобразованного лазерного пучка в горизонтальной или наклонной плоскости. В этом случае преобразованный пучок автоматически возвращается в первоначальное положение при случайных наклонах прибора

в процессе контроля, т. е. прибор может работать как автоматический лазерный нивелир.

Измеритель “Лазерная струна” имеет следующие технические характеристики:

Рабочее расстояние, м от 1 до 100 и более

Пределы измеряемых отклонений:

фотоэлектрическим способом, мм  $\pm 3,0$

визуальным способом, мм  $\pm 5,0$

Погрешность отсчета линейных отклонений от оси лазерного пучка в зависимости от применяемых измерительных устройств:

визуальных, мм, до 30 м  $5 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-2}$

более 30 м  $3 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-1}$

фотоэлектрических, мм, до 30 м  $10^{-3} - 10^{-2}$

более 30 м  $10^{-2} - 10^{-1}$

Тип лазера – “Лазерный модуль HLD PM-12-5-655”

Габариты лазерной трубки, мм 250×50

Масса лазерной трубки, кг 0,5

Габариты прибора на лафете, мм 390×190×150

Проводились исследования точностных характеристик лазерного измерителя непрямолинейности “Лазерная струна” с использованием в качестве базы отсчета оси кольцевой структуры преобразованного лазерного излучения (табл. 1). В качестве приемника использовалась визирная система с окуляром 7<sup>x</sup>. В частности, сравнивались погрешности измерения прибора “Лазерная струна” и аттестованного,



Рис. 4. Подставка с лазерной трубкой диаметром 50 мм.



Рис. 5. Подставка с визуальным приемником.



**Таблица 1.** Погрешности измерения приборов “Лазерная струна” (ЛС) и “Оптическая струна ДП-477М” (ОС)

№ контрольной точки	Условия проведения измерений		Среднее арифметическое значение по 5-ти отсчетам, мкм		Погрешность измерения, мкм	
	расстояние до контрол. точки, м	измеряемое отклонение, мкм	ЛС	ОС	ЛС	ОС
1	4	20	21	21	1	1
2	10	20	23	26	3	6
3	20	20	25	35	5	15

**Таблица 2.** Погрешности визирования ( $M$ ) Лазерной струны

№ контрольной точки	Расстояние до контрольной точки, м	Среднеквадратическая ошибка по 10-ти отсчетам ( $\sigma$ ), мкм	Погрешность визирования $M = \sigma/\sqrt{n}$ , мкм
1	1,0	$\pm 1,0$	$\pm 0,3$
2	4,0	$\pm 2,2$	$\pm 0,67$
3	9,0	$\pm 5,0$	$\pm 1,5$
4	15,0	$\pm 10,5$	$\pm 3,2$
5	20,0	$\pm 16,0$	$\pm 4,8$

высокоточного прибора “Оптическая струна ДП-477М”, работа которого основана на визирном методе измерений. На дистанции 20 м определялось задаваемое индикатором с ценой деления 1 мкм смещение приемника величиной 0,02 мм в вертикальной плоскости относительно оси прибора с помощью Лазерной струны и смещение визирной марки с помощью Оптической струны. Измерение проводилось в нескольких точках трассы при расположении приемника или марки на расстояниях 4, 10 и 20 м от прибора и определяли погрешности измерений в указанных точках двумя приборами. Результаты измерений, приведенные в таблице, показывают более высокую точность измерений прибором “Лазерная струна” на дальних расстояниях.

Исследовались также и погрешности визирования Лазерной струны (табл. 2). На дистанции 20 м в нескольких точках трассы определялась среднеквадратическая ошибка ( $\sigma$ ) по 10-ти измерениям ( $n$ ). Результаты измерений, приведенные в табл. 2, подтверждают, что точность наведения измерителя “Лазерная струна” на больших дистанциях выше, чем у перечисленных выше визирных приборов. Увеличение погрешности измерений у Лазерной струны определяется в основном состоянием воздушной среды.

Отличительными особенностями Лазерной струны являются стабилизация лазерного

пучка как отсчетной базы в пространстве и во времени и, как следствие, высокие точностные характеристики, сохраняющиеся на всей трассе измерений. Отсутствие фокусировки луча на всей трассе контроля и необходимости в какой-либо регулировке и настройке в процессе измерения и контроля, т. е. присутствия оператора у прибора при его работе, отсутствие требований к специальной подготовке и высокой квалификации оператора существенно упрощают его эксплуатацию.

Кроме этого в лазерном измерителе непрямолинейности возможны автоматическая компенсация наклонов прибора и полная автоматизация процесса контроля и управления технологическими процессами и объектами.

Измеритель “Лазерная струна” разработан и изготовлен в ГОИ им. С.И. Вавилова совместно с предприятием ООО НТП “Градан”, успешно прошел испытания в условиях производства в ОАО “Пролетарский завод” (Санкт-Петербург), на других предприятиях (ООО “НПФ Завод “Измерон”, Санкт-Петербург, ЗАО “Петрозаводскмаш”, Петрозаводск) идет его освоение. Успешным примером применения этого прибора для контроля формы и взаимного расположения поверхностей крупногабаритных изделий являются положительные результаты контроля и установки положения плоских и сферических зеркал имитатора Солнечного излучения габаритами более 3,5 м.

На состоявшейся 13–15 марта 2012 г. Международной выставке “Петербургская техническая ярмарка” лазерный измеритель непрямолинейности “Лазерная струна” участвовал

в конкурсе “Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года” и был награжден дипломом II степени (с вручением серебряной медали).

\* \* \* \* \*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пинаев Л.В., Леонтьева Г.В., Бутенко Л.В., Серегин А.Г. Лазерный измеритель непрямолинейности // Патент РФ № 2457434. 27.07.2012.
  2. Левин Б.М. Объектив // А. с. № 173977. Бюл. изобр. 1965. № 16.
  3. Кисам Ф. Оптические приборы. М.: Машиностроение, 1966. С. 41.
-