

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДИАМЕТРА КАБЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ДИФРАКЦИОННОГО МЕТОДА

Е.М. Фёдоров, А.Е. Гольдштейн

В работе рассмотрен дифракционный метод измерения наружного диаметра круглых протяжённых объектов в расходящемся лазерном пучке, позволяющий повысить до единиц микрометров разрешающую способность оптических измерительных преобразователей применяемых в приборах для технологического контроля цилиндрических протяжённых изделий, таких как кабели, провода шнуры, проволока и т.п. Рассмотрены некоторые аспекты технической реализации конструкции и программно-аппаратной части измерителя диаметра на основе описанного дифракционного метода. Представлены технические и метрологические характеристики разработанного и апробированного в условиях реального производства измерительного прибора «LDM-20».

Ключевые слова: технологический контроль диаметра; дифракция; расходящийся пучок.

Введение

Измерение диаметра круглых протяжённых изделий в расходящемся световом потоке имеет ряд преимуществ относительно других оптических методов. В частности отсутствие зеркальной и линзовой оптики, а также подвижных оптических узлов значительно упрощает оптическую схему и конструкцию первичного измерительного преобразователя. Благодаря надёжной конструкции и сравнительной простоте изготовления и юстировки, разработка и производство двухкоординатных измерителей диаметра на основе данного метода является перспективным направлением в кабельном приборостроении. Применение описанного способа контроля совместно с дифракционным методом детектирования границ объекта контроля позволяет создавать высокоточные технологические приборы с высокой разрешающей способностью.

1. Дифракционный метод измерения диаметра в расходящемся лазерном пучке.

Метод измерения диаметра протяжённых изделий в расходящемся световом потоке основан на определении границ тени объекта с использованием многоэлементных линейных фотоприёмников в двух ортогональных измерительных каналах. На рис. 1 схематично показан оптический двухкоординатный первый преобразователь, реализующий данный метод. Пунктирной линией указан ход лучей, которые проходят от соответствующих квазиточечных излучателей *LAZ1* и *LAZ2* по касательной к краям контролируемо-

го объекта и формируют границы света – тени $t1_f$, $t1_s$ и $t2_f$, $t2_s$ на соответствующих многоэлементных фотоприёмниках *CCD1* и *CCD2*. Подробное описание метода и функций преобразования первичной измерительной информации приведены в работах [1, 2, 3].

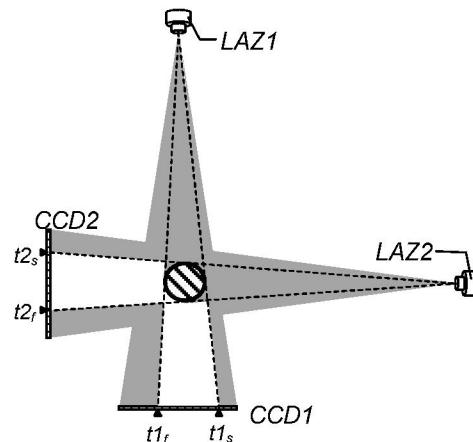


Рисунок 1- Метод измерения диаметра в расходящемся световом пучке. *LAZ1*, *LAZ2*, точечные излучатели, а *CCD1* и *CCD2* многоэлементные фотоприёмники соответственно первого и второго измерительных каналов: $t1_f$, $t1_s$ и $t2_f$, $t2_s$ – изображения границ теней объекта

На практике определение точного геометрического положения теней объекта по фронту или срезу изображения его тени на многоэлементном приёмнике является очень сложной задачей, так как крутизна и форма изображений границ меняется в зависимости от локальной освещённости фотоприёмника,

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДИАМЕТРА КАБЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ДИФРАКЦИОННОГО МЕТОДА

от положения измеряемого объекта относительно поверхности фотоприёмника в ортогональной ему плоскости. На достоверность определения границ тени контролируемого объекта влияют, неизбежно возникающие в процессе эксплуатации измерительного оборудования, дефекты – такие как царапины оптических стёкол, пыль, загрязнения и т.п. Даже если учесть или исключить все вышеуказанные факторы, то всё равно погрешность приборов основанных на данном методе ограничена дифракционными эффектами на границе измеряемого объекта, которые приводят к размытию фронтов изображения тени объекта. Методы, использующие эффект дифракции, для определения размеров сверхтонких непрозрачных объектов в частности волокон диаметром до нескольких сотен микрон известны давно и описаны в работах [4 – 6].

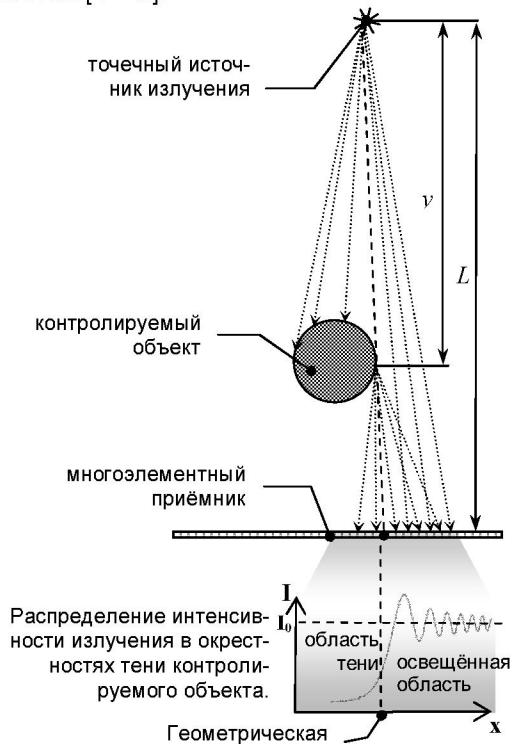


Рисунок 2 - Эффект дифракции на границе цилиндрического объекта.

В работах [5, 6] описаны дифракционные эффекты на границе непрозрачных объектов в параллельном световом пучке. Их широко применяют для повышения точности контроля геометрических размеров объектов, в частности кабелей валов и т.п.

Суть эффекта дифракции на границе непрозрачных объектов пояснена рис. 2. Свет частично проникает в область геометрической тени, а в освещённой области формирует систему дифракционных минимумов и

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №1 2015

максимумов, различие между которыми постепенно уменьшается и интенсивность света приближается к значению начальной освещённости I_0 . Расстояние от источника до приёмника L зависит от конструктивных особенностей оптического измерительного преобразователя и является величиной постоянной. Значение параметра y может изменяться в зависимости от положения объекта в зоне контроля.

На рисунке 3 показано распределение дифракционных экстремумов в области границы тени объекта. В случае, когда граница тени проецируется на плоскость фотоприёмника ортогонально, расстояние X_i от точки геометрической тени X_t до соответствующего максимума M_i дифракционной картины и расстояние x_i от той же точки X_t до соответствующего минимума m_i определяются следующими выражениями:

$$X_i = \sqrt{\frac{\lambda L(L-y)}{2y} \left(4i + \frac{3}{2} \right)},$$

$$x_i = \sqrt{\frac{\lambda L(L-y)}{2y} \left(4i + \frac{7}{2} \right)}$$
(1)

где i – номер соответствующего максимума или минимума начиная с нулевого, L – расстояние от точечного источника излучения до многоэлементного фотоприёмника, y – расстояние от источника до границы объекта на котором происходит дифракция, λ – длина волны источника излучения – лазера (рис. 1).

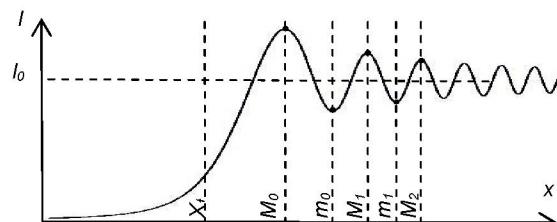


Рисунок 3- Распределение дифракционных экстремумов на видеоизображении окрестностей геометрической границы тени: X_t – геометрическая граница тени; M_0, M_1, M_2 – положение максимумов первого, второго и третьего порядков; m_0, m_1 – положение минимумов первого и второго порядков

Положение проекции геометрической границы тени X_t на многоэлементном приёмнике является исходной величиной для вычисления диаметра объекта по методу, описанному в работе [7]. Найти положение проекции геометрической границы тени можно определив расстояние между первыми двумя максимумами (отрезок M_0M_1) или минимумами (отрезок m_0m_1) что видно из рисунка 3.

Так как в выражении (1) множитель $\sqrt{\lambda L(L-y)/2y}$ остаётся постоянным для положения всех экстремумов, то их распределение определяется множителем $\sqrt{4i+3/2}$ для максимумов и соответственно множителем $\sqrt{4i+7/2}$ для минимумов. Таким образом, расстояния между экстремумами могут пропорционально меняться в зависимости от параметров L и y , но их соотношения остаются постоянными. В частности отрезок $X_t M_0$ относится к отрезку $M_0 M_1$ с постоянным коэффициентом $k_m=1.093$, а отрезок $X_t m_0$ к отрезку $m_0 m_1$ с коэффициентом $k_m=2.154$. Это свойство позволяет вывести выражения для нахождения координат положений геометрических границ теней переднего и заднего фронтов видеоизображения объекта сканируемого многоэлементным линейным фотоприёмником.

$$\begin{aligned} X_{ft} &= 1.093(M_0 - M_1) + M_0 = \\ &= 2.154(m_0 - m_1) + m_0, \\ X_{st} &= M_0 - 1.093(M_1 - M_0) = \\ &= m_0 - 2.154(m_1 - m_0) \end{aligned} \quad (2)$$

где X_{ft} и X_{st} – положения передней и задней границы тени; M_0 , M_1 , m_0 , m_1 – экстремумы дифракционного распределения. В работе [8] более подробно изложен способ определения положения границы тени при произвольном расположении объекта в зоне контроля.

2. Техническая реализация измерителя диаметра.

Эффективность метода измерения диаметра на основе дифракционного метода в расходящемся пучке практически оценена при разработке и исследовании серии измерителей диаметра «LDM-20». В основе приборов заложены четыре принципиальных отличия от известных измерителей подобного типа.

1. В качестве источника излучения применен инфракрасный полупроводниковый лазерный модуль с большим углом расходности, характеристики которого близки к характеристикам идеального точечного монохроматического источника, что обеспечивает возможность детектировать дифракционные эффекты на границах тени контролируемого объекта.

2. Из оптической схемы исключены элементы линзовой или зеркальной оптики, следовательно, отсутствуют связанные с ними aberrации, обуславливающие погрешность измерения.

3. Для повышения достоверности измерения диаметра и для определения овальности, измерение диаметра осуществляется по двум ортогональным осям, а также реализована совместная обработка данных двух измерительных каналов и их взаимная коррекция, чем устраняется погрешность, вызванная перечными перемещениями контролируемого изделия.

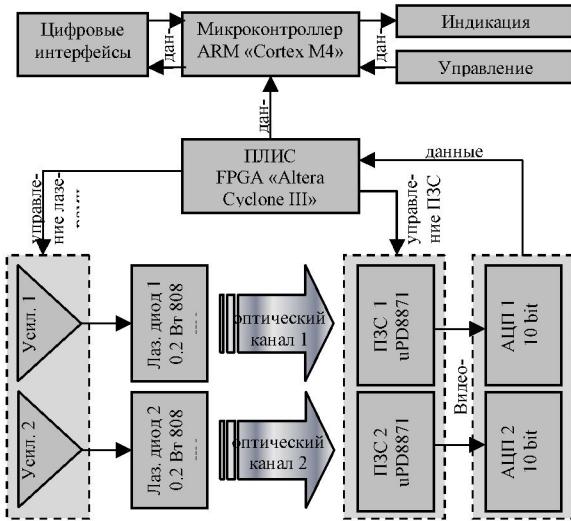


Рисунок 4 - Обобщённая структурная схема измерителя диаметра

Обобщённая структурная схема, характерная для данного класса измерителей диаметра, приведена на рис. 4. Конвейер управляющих и синхронизирующих сигналов, обслуживающих линейные фотоприёмники и лазерные излучатели реализован на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) FPGA «Altera Cyclone III». В качестве фотоприёмников применяются линейные ПЗС сенсоры NEC μPD8871 имеющие 10680 светочувствительных элементов и размер элементарной ячейки 4×4 мкм. Частота сканирования ПЗС составляет 1000 кадров в секунду со временем экспозиции порядка 50 мкс. Это позволяет производить измерения на динамичных объектах, движущихся со скоростями до 300 м/мин. Квазиточечный источник излучения реализован на базе полупроводникового инфракрасного лазера HLDH-808-B20001 с длиной волны 808 нм, оптической мощностью 0,2 Вт и углом расходности луча 32°. Схема включения лазерных диодов содержит в себе усилители импульса накачки, а также линии обратной связи позволяющие стабилизировать яркость лазера в зависимости от внешних условий,

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДИАМЕТРА КАБЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ДИФРАКЦИОННОГО МЕТОДА

таких как изменение температуры окружающей среды, загрязнение оптических поверхностей, падение интенсивности лазерного излучения за счёт его естественного старения и т.д. Аналоговое изображение от оптических преобразователей подаётся на быстродействующие (частота преобразования 60 МГц) АЦП соответствующего канала. После преобразования видеосигнала в цифровой 10 битный код он подаётся на ПЛИС где также реализован программно-аппаратный детектор, который отслеживает положение характерных точек дифракционной картины и определяет точное положение границ тени объекта.

Основной задачей предварительной электронной обработки сигнала с помощью ПЛИС является вычисление минимумов (m_1 , m_2) и максимумов (M_1 , M_2) фронта и спада для дальнейшего расчета реальной границы тени (X_{ft} или X_{st}) (рис. 3).

Для решения данной задачи был разработан алгоритм (рис.5) с возможностью реализации на ПЛИС.

На вход детектора знака производной 1 поступают последовательные данные о напряжении на ячейках ПЗС и тактовые импульсы счета ячеек. При изменении знака производной сигнала детектор выдает на выход управляющий сигнал буферам 4 и 5. FIFO буферы 4 и 5 принимают на вход номер ячейки и управляющий сигнал детектора смены знака производной 1 и выдают на выход последние 4 принятые значения номера ячейки. Детектор переднего фронта тени 2 принимает на вход последовательные данные о напряжении на ячейках ПЗС и выдает управляющий сигнал на защелку 7 при детектировании переднего фронта. Детектор заднего фронта тени 3 принимает на вход последовательные данные о напряжении на ячейках ПЗС и выдает управляющий сигнал счетчику 6 при детектировании заднего фронта. Счетчик 6 принимает на вход управляющий сигнал детектора знака производной 1 и инкрементирует от нуля внутренний регистр по каждому такому сигналу. По достижении значения внутреннего регистра равным 4 счетчик выдает управляющий сигнал на защелку 8. Защелки 7 и 8 принимают на вход управляющие сигналы и параллельно четыре номера ячеек каждой. При поступлении управляющего сигнала каждая защелка выдает на выход принимаемые номера ячеек. Сброс всех регистров и состояний (кроме защелок) производится при достижении счетчиком верхнего значения или по сигналу начала кадра. Далее

полученные значение экстремумов фронта и спада тени преобразуются в значение координат границы тени объекта.

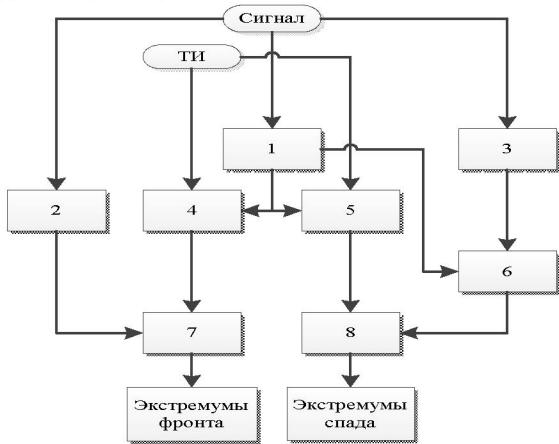


Рисунок 5 - Схема алгоритма детектирования минимумов и максимумов фронта и спада

После определения положения границ тени по обоим измерительным каналам полученные данные по интерфейсу SPI передаются в микроконтроллер ARM «Cortex M4», где происходит окончательный расчёт диаметра измеряемого объекта на основе функций преобразования представленных в работах [1,2,3]. Также в микроконтроллере измеренные данные подвергаются усреднению и статистической обработке при помощи встроенных программно-аппаратных вычислительных средств. Готовый результат измерения передаётся на устройство индикации и на внешние цифровые устройства посредством цифровых интерфейсов (RS485, RS232, USB, и др.) для целей дополнительного отображения результатов контроля, управления процессом производства (АСУ), диагностики и сервисного обслуживания.

Измерительная головка представляет собой законченное устройство, имеющее собственный сетевой источник питания и встроенный цифровой индикатор «Диаметр». Головка устанавливается с помощью монтажных узлов в технологической линии изготовления кабеля. Через рабочую зону головки проходит контролируемый кабель. Измерение производится непосредственно во время движения кабеля, при этом на встроенным индикаторе отображается средний диаметр изделия.

Для удобства работы оператора технологической линии, рабочее место которого удалено от места установки измерительной головки, в комплект измерителя может входить выносной блок индикации. Блок разме-

ФЁДОРОВ Е.М., ГОЛЬДШТЕЙН А.Е.

щается на рабочем месте оператора. Связь выносного блока с измерительной головкой осуществляется по двухпроводной цифровой линии связи.



Рисунок 6 - Внешний вид измерителя «LDM-20»

Корпус измерителя диаметра «LDM-20» выполнен в виде цельного фрезерованного основания, на котором установлены основные элементы оптических измерительных преобразователей, а также электрические платы приёмников излучения и контроллера. Основание установлено в корпус, также представляющий собой монолитную деталь, на которой установлены органы отображения и управления передней и задней панелей прибора. Такая реализация конструкции измерителя обеспечивает её механическую жесткость. Это исключает подвижки и деформации корпуса, которые могут повлиять на точность показаний прибора. Корпус измерителя со стороны установки электронных плат закрывается крышкой, которая обеспечивает герметичность измерительного прибора. С другой стороны корпуса расположен отсек, обеспечивающий доступ обслуживающего персонала к оптическим элементам измерительных каналов для их периодического технического обслуживания. В рабочем состоянии отсек измерителя закрыт крышкой. На боковых крышках измерителя нанесена разметка, позволяющая облегчить процесс центрирования измеряемого изделия в рабочей зоне. Общий вид прибора «LDM-20» показаны на рисунке 6.

Заключение

Первая партия измерителей «LDM 20» выпущена фирмой ООО «НПО Редвилл» в 2014 году и поставлена предприятиям кабельной промышленности России. При эксплуатации измерителей подтвердились их высокие технические, эксплуатационные и метрологические характеристики.

Основные характеристики измерителя «LDM 20»: размер рабочей зоны – круг диаметром 26 мм, минимальный измеряемый диаметр 0,5 мм, максимальный измеряемый диаметр 20 мм, погрешность измерения диаметра в центре рабочей зоны, не более 2 мкм, время экспозиции 50 мкс, количество измерений за 1 с 1000, максимальная скорость движения контролируемого кабельного изделия, м/мин 3000, допустимая амплитуда вибраций кабеля, не более 4 мм, допустимая частота вибраций кабеля, не более 1000 Гц

метром 26 мм, минимальный измеряемый диаметр 0,5 мм, максимальный измеряемый диаметр 20 мм, погрешность измерения диаметра в центре рабочей зоны, не более 2 мкм, время экспозиции 50 мкс, количество измерений за 1 с 1000, максимальная скорость движения контролируемого кабельного изделия, м/мин 3000, допустимая амплитуда вибраций кабеля, не более 4 мм, допустимая частота вибраций кабеля, не более 1000 Гц

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свендрюковский А.Р. Расчёт диаметра в бесконтактных двухкоординатных измерителях // I всероссийская конференция Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения – Томск, 2005 – С. 31–33.
2. Фёдоров Е.М., Эдличко А.А. Вычисление геометрических параметров двухкоординатных измерителей диаметра протяженных изделий // Известия Томского Политехнического Университета. – 2008 г. – Т. 313 – №2 – С. 87–93.
3. Фёдоров Е. М., Гольдштейн А. Е., Редько В. В. Методы и приборы оптического бесконтактного двухкоординатного контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства // Ползуновский вестник / Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (АлГТУ). — 2010. — № 2. — С. 141–149.
4. Chi-Tang Li, James V. Tietz, Improved accuracy of the laser diffraction technique for diameter measurement of small fibres // Journal of Materials Science, November 1990, Volume 25, Issue 11, P. 4694-4698
5. Soraya A. Khodier, Measurement of wire diameter by optical diffraction // Original Research Article Optics & Laser Technology, Volume 36, Issue 1, February 2004, P. 63-67
6. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 3rd Edition Pergamon Press, 1965, 985 P.
7. Toenshoff, H. K., Tuennermann, A., Korthals, J., SPIE, Use of Fresnel diffraction for the measurement of rotational symmetrical workpieces // PROCEEDINGS- SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 1999, №3784, P. 334-343.
8. Yury A. Chursin, Evgeny M. Fedorov "Methods of resolution enhancement of laser diameter measuring instruments"//Optics & Laser Technology, Volume 67, 2015, Pages 86-92

Фёдоров Евгений Михайлович - к.т.н. доцент кафедры информационно-измерительной техники ИНК ТПУ. Р.т. 41-89-11. E-mail: evgeny_fyodorov@list.ru.

Гольдштейн Александр Ефремович - д.т.н., зав. кафедрой информационно-измерительной техники ИНК ТПУ. Р.т. 41-89-11. E-mail: algol@iit.b10.tpu.edu.ru