

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

SURFACE PROFILE SENSOR

A. Cherepanov
I. Tyshchenko
M. Popova
D. Vakhnin
Yu. Bochkarev
S. Pesterev

Summary. This article gives an overview of the of development of an optoelectronic surface profile sensor (primary sensor of various measuring instruments and systems) designed for non-contact measurement and control of surface profile, position, displacement, dimensions, recognition of technological objects, construction of 3D models. The description of the chosen design solution and the scheme of operation of the optical system is given. In particular, the calculation of the laser triangulation sensor is given and methods for increasing the measurement accuracy are described. In the article the structural scheme of the sensor and the conditions of its operation are presented.

Keywords: optoelectronic sensor, optical systems, surface profile control, psd photosensor, automated measuring systems, cmos-matrix, laser triangulation.

Черепанов Александр Николаевич

К.ф.-м.н., доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, tchustu@mail.ru

Тыщенко Игорь Сергеевич

Лаборант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, tis-public@yandex.ru

Попова Мария Александровна

Лаборант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, mari.mashapopova@mail.ru

Вахнин Дмитрий Олегович

Лаборант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, dmitrii.vakhnin@gmail.com

Бочкарев Юрий Владимирович

Инженер, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, bocha@d-test.ru

Пестерев Сергей Николаевич

Директор, ООО «Оптические измерительные системы»
pesterev@d-test.ru

Аннотация. В данной статье приведен обзор процесса разработки оптоэлектронного датчика профиля поверхности (первичный сенсор различных измерительных приборов и систем), предназначенного для бесконтактного измерения и контроля профиля поверхности, положения, перемещения, размеров, распознавания технологических объектов, построения 3D моделей. Приведено описание выбранного конструктивного решения и схемы работы оптической системы. В частности, приведен расчет лазерного триангуляционного датчика и описаны методы повышения точности измерения. В статье представлена структурная схема датчика и условия его эксплуатации.

Ключевые слова: оптоэлектронный датчик, оптические системы, контроль профиля поверхности, psd фотосенсор, автоматизированные измерительные системы, cmos-матрица, лазерная триангуляция.

Введение

Датчик профиля поверхности оптоэлектронный (далее по тексту «датчик») разрабатывается как первичный сенсор (электронный узел) различных измерительных приборов и систем. Датчик предназначен для бесконтактного измерения и контроля про-

филя поверхности, положения, перемещения, размеров, распознавания технологических объектов, построения 3D моделей. С использованием датчиков обеспечивается сканирование измеряемой поверхности с высокой частотой и точностью. Результатом сканирования является облако точек измеряемой поверхности в абсолютных величинах с требуемыми метрологическими

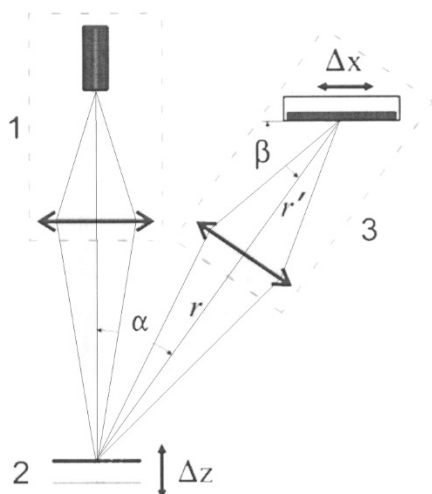


Рис. 1. Схема лазерного триангуляционного датчика

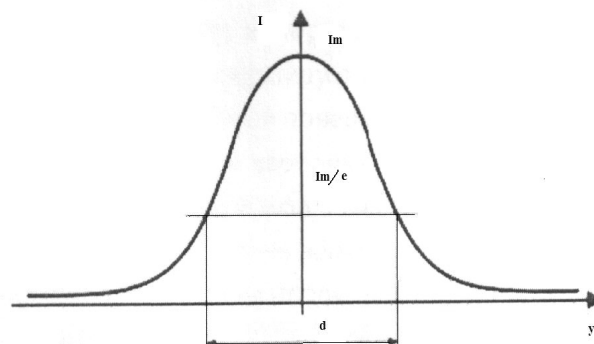


Рис. 2. Распределение Гаусса (I – интенсивность света, y — направление перпендикулярное распространению излучения, d — ширина зондирующего пучка).

Таблица 1. Основные технические характеристики датчика

Тип датчика	триангуляционный двумерный сенсор с встроенной лазерной подсветкой
Диапазон измерения, мм	от 140 до 250
Ширина измеряемого профиля, мм	не менее 50
Предел абсолютной погрешности измерения, % от диапазона	0,1
Быстродействие в обычном режиме,	250 профилей/с
Быстродействие в режиме повышенной частоты	500 профилей/с
Максимальное быстродействие	1900 профилей/с
Линейность, Z ось	±0.1% от диапазона
Разрешение, Z ось	0.1% от диапазона
Линейность, X ось	±0.2% от диапазона
Разрешение, X ось	80, 160, 320, 640 или 1 280 точек/профиль
Интерфейс связи	Ethernet IPv4, RS485
Электропитание, В	9–36 постоянного тока
Защита от внешних воздействий	IP67
Масса, кг, не более	1.5
Потребляемая мощность, Вт, не более	5
Габариты размеры (Д×Ш×В), мм, не более	110x150x60

характеристиками расположенных в системе координат датчика. Применение датчика возможно в следующих областях: различные отрасли промышленности (пищевая, фармацевтическая, химическая и т.д.), металлургия, нефтегазовая промышленность, приборостроение. Датчик позволяет проводить измерение: зазоров, диаметра, овальности, отклонения от круга, сварных швов, профиля поверхности, нарезов, дефектов, геометрических размеров различных изделий, а также проводить распознавание объектов.

Описание выбранной конструкции

Бесконтактные оптико-электронные методы измерения геометрических параметров изделий широко применяются для решения задач промышленного размерного контроля. Одним из таких методов является метод лазерной триангуляции, принцип действия которого состоит в формировании на контролируемой поверхности светового пятна, построении изображения этого пятна на многоэлементном фотоприемнике, определении по-

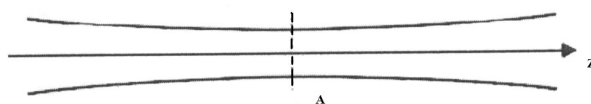


Рис. 3. Пучок Гаусса в продольном разрезе

ложения X изображения и расчете (по известной зависимости) координаты Z поверхности.

В рамках данной статьи разработан двумерный триангуляционный датчик, который выполняется в классической однокорпусной компоновке со встроенным высокоскоростным вычислителем. Такой датчик легок в использовании, не требует перекалибровки после монтажа/демонтажа и способен выдавать массив координат измеряемого объекта в абсолютных координатах без дополнительного внешнего вычислителя.

Основная задача, решаемая триангуляционным датчиком — это бесконтактное определение расстояния до объекта измерения, но на основе одного или нескольких лазерных триангуляционных датчиков могут быть реализованы лазерные 2D/3D измерители профиля, лазерные 3D сканеры, системы контроля и диагностики различных объектов, а также системы распознавания.

Конструктивное решение

Схему лазерного триангуляционного датчика условно можно разделить на три части (рис. 1): излучающий канал, контролируемая поверхность, приемный канал.

Первая часть схемы — излучающий канал, который состоит из источника излучения и объектива, который формирует зондирующий пучок на контролируемой поверхности. В качестве источника излучения, как правило, используется лазерный диод. Распределение света, создаваемое такими источниками, называется гауссовым (рис. 2).

Шириной d зондирующего пучка называется расстояние между точками профиля интенсивности на уровне I_{\max}/e .

Перетяжкой пучка Гаусса называется минимальная ширина пучка вдоль направления распространения. На рис. 3 перетяжка расположена в плоскости A . Очевидно, в этой плоскости интенсивность зондирующего пучка достигает максимального значения.

Объектив состоит из одной или нескольких оптических линз. Относительное положение объектива и лазерного диода определяет настройку излучающего канала. Чтобы настроить лазерный модуль необходимо

выставить перетяжку в центр диапазона измерения и отцентрировать зондирующий пучок.

Результатом хорошей настройки является отцентрированный пучок, ширина и интенсивность которого симметрично изменяются относительно центра диапазона измерений.

Вторая неотъемлемая часть схемы лазерного триангуляционного датчика — это контролируемая поверхность. Каждая поверхность имеет свойство отражать или рассеивать падающее излучение. Рассеяние зондирующего излучения поверхностью контролируемого объекта используется в триангуляции как физическая основа для получения информации о расстоянии до этой поверхности. Поэтому, свойство контролируемой поверхности рассеивать зондирующее излучение является неотъемлемой частью лазерного триангуляционного датчика.

Третья часть схемы лазерного триангуляционного датчика — приемный канал, который состоит из проецирующего объектива и фотоприемника.

Проецирующий объектив формирует изображение зондирующего пятна в плоскости фотоприемника. Чем больше диаметр D объектива, тем выше его светосила, тем интенсивнее и качественнее строится изображение пятна.

В зависимости от конкретной реализации, для регистрации сформированного изображения в качестве приемника используют либо фотодиодную матрицу (ПЗС), либо позиционно-чувствительный фотоприемник (PSD). По разрешающей способности PSD превосходит ПЗС в 10 раз. Также при использовании PSD может быть достигнута большая частота измерений, чем при использовании ПЗС. Однако PSD фотоприемники могут быть использованы только при построении 1D триангуляционного датчика, имеют ряд ограничений по использованию и не рассматриваются в рамках настоящей статьи.

Расчет триангуляционного датчика

Схема лазерного триангуляционного датчика, приведенная на рис. 1, работает следующим образом. Излучающий канал 1 формирует изображение светового пятна на контролируемой поверхности 2. Далее рассеянный контролируемой поверхностью свет попадает в прием-

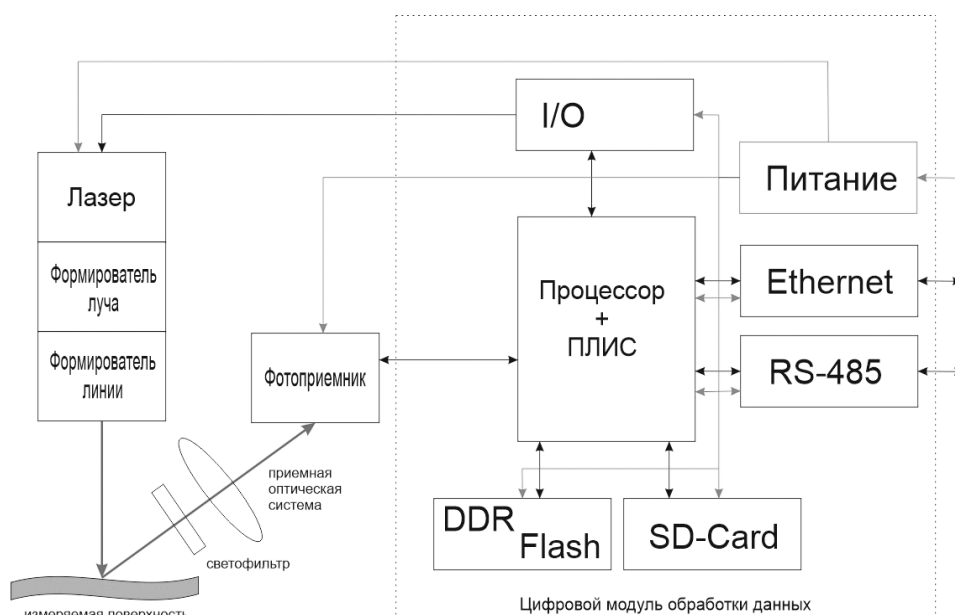


Рис. 4. Структурная схема датчика

ный канал 3. Таким образом, в плоскости фотоприемника создается изображение освещенного участка контролируемой поверхности (световое пятно). При смещении контролируемой поверхности на величину dZ , световое пятно в плоскости фотоприемника смещается на величину dX (рис. 1). Зависимость смещения контролируемой поверхности dZ от смещения светового пятна в плоскости фотоприемника dX в общем случае имеет следующий вид:

$$Z = \frac{X}{\gamma \cdot \sin \alpha}, \quad (1)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{f}{r+f},$$

для случая $r \gg f$, где f — фокусное расстояние линзы проецирующего объектива, r — расстояние от контролируемой поверхности 2 до проецирующего объектива приемного канала, α — угол между оптической осью приемного канала и зондирующим лучом передающего канала пересекающиеся на контролируемой поверхности расположенной в центре диапазона измерений смещений (рис. 1).

Это уравнение выполняется только для $dZ \ll r$, так как в этом случае угол α можно считать постоянным.

При условии, что мы можем конструктивно выполнить датчик таким образом и точно измерить угол α (который будет всегда постоянным и нам известным) мы можем вывести формулы, точно описывающие зависимость Z от X во всем диапазоне измерений. Например, для $\alpha = 45^\circ$ формула приобретает вид:

$$Z = \frac{\sqrt{2} \cdot X}{\gamma \cdot (1 + \frac{X}{r})} \quad (2)$$

При движении поверхности объекта в вертикальном направлении происходит изменение величины r и связанной с ней величины r' . При этом изображение световой точки перемещается не только по оси X , но и вдоль оси оптической системы. Это означает, что только для единственного положения объекта (в центре диапазона измерения смещений) световая точка сфокусирована на оси X . При перемещении объекта из центрального положения в какую-либо сторону происходит размытие изображения. Этот эффект можно исключить, повернув плоскость изображения на угол β таким образом, чтобы изображение световой точки всегда было резким. Выражение для угла β будет иметь вид:

$$\beta = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{\gamma}{\tan \alpha} \right) \quad (3)$$

Также существуют программные методы повышения точности измерений лазерным триангуляционным датчиком, связанные с алгоритмами дополнительной обработки сигнала такие, как: интерполяция дискретного изображения для достижения субпиксельного разрешения, сглаживание видеосигнала для уменьшения влияния шероховатостей и неоднородностей и др. методы.

Концепция построения датчика

Датчик является классическим лазерным триангулятором. Используется двумерная триангуляция.

Принцип оптической триангуляции основан на проецировании изображения лазерной линии на измеряемом объекте на CMOS-матрицу через оптическую систему.

Излучение полупроводникового лазера формируется в виде линии и проецируется на объект. Диффузионное излучение на объекте (изображение линии) объективом собирается на двумерной CMOS-матрице. Полученное изображение контура объекта анализируется на ПЛИС и процессором, который рассчитывает расстояние до объекта (координата Z) для каждой из множества точек вдоль лазерной линии на объекте (координата X). Сканеры характеризуются началом рабочего диапазона (мертвая зона) по координате Z, рабочим диапазоном (диапазон Z) по координате Z, рабочим диапазоном по координате X в начале рабочего диапазона по Z (диапазон X передний) и в конце рабочего диапазона по Z (диапазон X задний).

Датчики могут использовать лазеры различной длины волны от 400 до 800 нм (ориентировочно). Использование различных длин волн обусловлено широким спектром задач сканирования поверхностей. Использование синих лазеров вместо традиционных красных и ИК существенно расширяет возможности датчиков, в частности, при контроле высокотемпературных объектов (горячий металл), а также органических материалов (пищевое волокно, жевательная резина).

При эксплуатации датчик устанавливается таким образом, чтобы контролируемый объект располагался в зоне рабочего диапазона датчика. Кроме того, в области прохождения падающего на объект и отраженного от него излучения не должно находиться посторонних предметов. При контроле объектов сложной формы и текстуры необходимо минимизировать попадание зеркальной составляющей отраженного излучения во входное окно датчика.

Электронные модули выполняются в виде двух- и четырехслойных печатных плат на FR-4 методом поверхностного монтажа. Все платы, разъемные соединения защищаются компаундом. Все резьбовые соединения фиксируются герметиком.

Все функциональные модули корпусируются в едином блоке (корпусе). Корпуса модулей изготавливаются из алюминиевого сплава и снабжаются крышками. Такие корпуса обеспечивают электромагнитную совместимость модулей, кондуктивный теплоотвод, механическое крепление и защиту.

Датчики могут устанавливаются (крепиться) на жесткое основание, используя три (четыре) крепежных отверстий. Для крепления одна из граней датчика выполняется точно и является базовой. Охлаждение датчика пассивное, за счет теплообмена через корпус датчика. Активная вентиляция используется для специальных применений и обеспечивается с помощью принудительной конвекции и теплообмена в защитном кожухе.

Заключение

В данной статье приводится обзор проблем, возникающих при построении оптоэлектронных датчиков профиля поверхности для контроля геометрических параметров различной продукции на производстве, а также приведены решения некоторых из них. Представлены основные принципы построения таких датчиков.

Было разработано конструктивное решение для данных профилемеров. Подробно описана расчет триангуляционной части датчика, смоделирована его структурная схема.

Работы по статье выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0161 от 01.12.2015 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев Д.Т. Оптические измерения. — М.: Машиностроение, 1987. — 264 с.
2. В.П. Коронкевич, А.Г. Полещук, А.Г. Седухин, Г.А. Ленкова Лазерные интерферометрические и дифракционные системы // Компьютерная оптика. — 2010, том 34, № 1, с. 4–23.
3. Н.П. Заказов, С.И. Кирышин, В.И. Кузичев Теория оптических систем. — М.: Физматлит, 1992. — 448 с.
4. Ю.М. Климов Прикладная лазерная оптика. — М.: Машиностроение, 1985. — 66 с.
5. Dr. Ralf Mayer Precision Injection Molding // Optic & Photonic. — 2007, Vol. 2, Issue 4, p. 2–60.

© Черепанов Александр Николаевич (tchustu@mail.ru), Тыщенко Игорь Сергеевич (tis-public@yandex.ru),
Попова Мария Александровна (mari.mashapopova@mail.ru), Вахнин Дмитрий Олегович (dmitrii.vakhnin@gmail.com),
Бочкарев Юрий Владимирович (bocha@d-test.ru), Пестерев Сергей Николаевич (pesterев@d-test.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»