

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ФОТОДАТЧИКИ

Александр Самарин, ведущий специалист ООО «Зелос»

Позиционно-чувствительные датчики — PSD* (Position sensitive detectors) в различных формах существуют вот уже около 30 лет, работая в системах фокусировки и управления позиционированием CD/DVD, головках самонаведения ракет, системах измерения расстояния и трехмерных лазерных сканирующих системах. PSD-фотодетекторы способны давать аналоговые координаты светового пятна, проецируемого на его поверхность. На их основе разработано много систем оптических измерений с использованием лазеров, сложной оптики, компьютеров и схем управления движением.

Датчики PSD являются малой, но очень важной частью всех этих систем. В качестве опорного направленного источника света для PSD-датчика, как правило, используется луч лазера — газового или твердотельного (в частности — полупроводникового).

Базовым источником подсветки может служить и лазерный светодиод, подобный тому, который используется в бытовых лазерных указках. Светодиод может быть установлен в одном корпусе с фотодатчиком. Лазерный луч проецируется параллельно основанию, достигает объекта, отражается от него и попадает через оптическую систему на рабочую поверхность PSD-датчика. Оптика может и отсутствовать. В качестве ориентира при измерении расстояний может использоваться световое пятно от луча лазера на поверхности объекта. Большое число простых измерителей расстояния обеспечивает точность около 0,1 мм. Однако с использованием PSD-датчиков достижима и большая точность.

PSD-датчики представляют собой кремниевые или германиевые фотодиоды, аналоговые выходные сигналы которых пропорциональны положению светового пятна на чувствительной поверхности датчика. Конструкция PSD-датчика позволяет одновременно контролировать как интенсивность падающего светового потока, так и его расположение на активной поверхности.

Существуют как одномерные PSD-датчики, так и двухмерные. Если использовать оптическую систему из нескольких двухмерных датчиков,

то можно определять и трехмерные пространственные координаты наблюдаемых объектов.

ОДНОМЕРНЫЕ PSD-ДАТЧИКИ

Одномерный PSD-датчик имеет активную поверхность в форме узкой полоски. Датчик позволяет определить положение светового пятна, которое перемещается вдоль полоски фоточувствительной поверхности. На рисунке 1 показан принцип измерения расстояний при помощи одномерного PSD.

Фототок, генерируемый в месте падения светового пятна, разделяется на две токовые компоненты. Их распределение позволяет определить местоположение светового пятна на полоске датчика. На рисунке 2 показана эквивалентная схема одномерного PSD-датчика, а на рисунке 3 — методика расчета положения светового пятна. Рисунок 4 иллюстрирует поперечное сечение одномерного датчика и принцип его работы.

Интенсивность тока зависит от светового потока, падающего на поверхность датчика. Зная угол падения луча на поверхность датчика, можно вычислить и расстояние между объектом и датчиком.

PSD является аналоговым детектором, способным непрерывно измерять расстояние до объекта. Основным недостатком описанного способа измерения состоит в том, что весь световой поток, отраженный от объекта, дает токовый вклад в датчике. Следовательно любой свет, который попадает в плоскость датчика (в том числе и солнечный фоновый свет), будет вносить ошибку измерения.



Рис. 1. Принцип измерения расстояний при помощи одномерного PSD

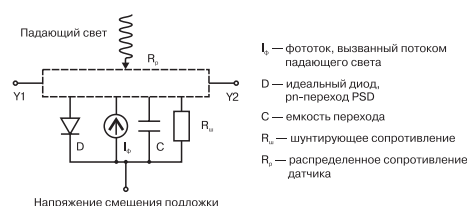


Рис. 2. Эквивалентная схема одномерного PSD-датчика

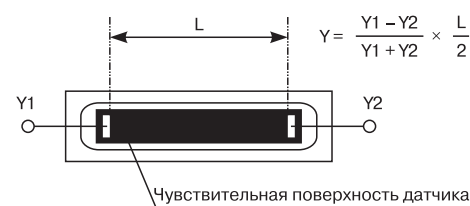


Рис. 3. Расчет положения светового пятна для одномерного датчика

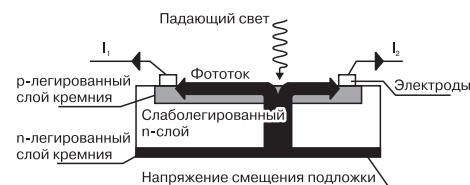


Рис. 4. Поперечное сечение одномерного датчика и принцип его работы

Отражательная способность поверхностей разных объектов также неодинакова и может давать рассеяние светового потока. Например, при отражении от деревянной поверхности световое пятно «размажется» вдоль волокон структуры поверхности. Это также приводит к ошибке в измерениях. Похожие проблемы возникают при измерении расстояний до объек-

* Аббревиатура PSD используется не только определения позиционночувствительных датчиков, но и других устройств, например: PSD — Programmable System Devices; PSD — Power Spectral Density; PSD — Portable Scheme Debugger.

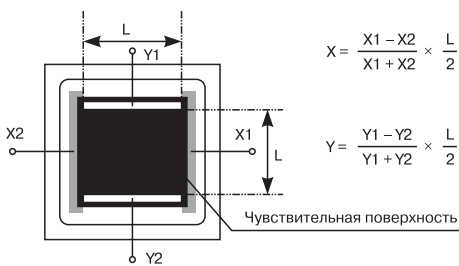


Рис. 5. Определение координат светового пятна для двумерного PSD-датчика

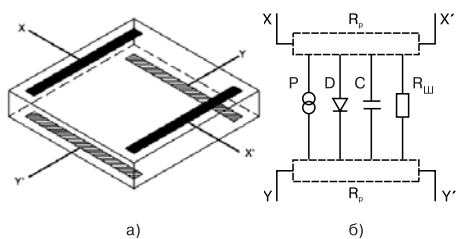


Рис. 6. Конструкция и эквивалентная схема датчика с двусторонним расположением электродов

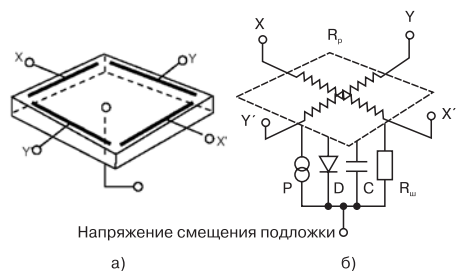


Рис. 7. PSD-датчик с четырехсторонним расположением электродов (2-D tetralateral type)

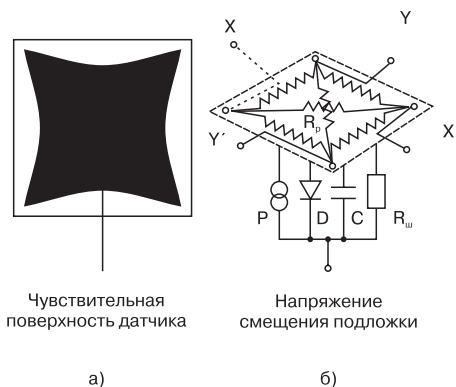


Рис. 8. Топология и эквивалентная схема PSD-датчика с четырехсторонним расположением электродов и компенсацией нелинейности (2-D pincushing type of PSD)

тов с неоднородной поверхностью и сложной формой.

ДВУХМЕРНЫЕ (2D) PSD-ДАТЧИКИ

Двухмерные датчики могут иметь активные структуры, выполненные по различным топологическим схемам. Различают следующие типы двухмерных датчиков:

- с двухсторонним расположением электродов (duolateral);
- с четырехсторонним расположением электродов (tetralateral);
- с четырехсторонним расположением электродов и компенсацией искажения сигнала (pincushion).

PSD-датчики с двухсторонним расположением электродов

Датчик с двухсторонним расположением электродов представляет собой полупроводниковый кристалл, на верхней и нижней поверхности которого взаимно перпендикулярно расположены две пары полосковых электродов (см. рис. 5). Датчик имеет четыре вывода. Фототок, возникающий в месте падения светового пятна на поверхность датчика, разделяется на две входных и две выходных компоненты. Распределение выходных токов определяет положение координаты Y, а распределение входных — координаты X положения светового пятна.

Датчики данного типа имеют резистивные слои, нанесенные с обеих сторон подложки, которые действуют как p-n переходы. Это обеспечивает наибольшую точность и разрешение таких датчиков, но вместе с тем и самую высокую их стоимость. Напряжение смещения в датчиках с такой геометрией обычно не используется.

Показанный на эквивалентной схеме (см. рис. 6) $R_{ш}$ — межэлектродный шунтирующий резистор — влияет на время оптического отклика. Обычно его сопротивление лежит в пределах 5...20 кОм. Чем больше поверхность датчика, тем больше его чувствительность, но больше и паразитная емкость перехода C и, следовательно, больше время оптического отклика.

Двухмерный PSD-датчик с четырехсторонним расположением электродов

На рисунке 7 показана конструкция PSD-датчика с четырехсторонним расположением электродов. У этого датчика электроды лежат в одной плоскости и рабочая поверхность всего одна. Данный тип PSD имеет

единственный чувствительный резистивный слой, расположенный с одной стороны подложки. Для подачи смещения имеется отдельный вывод с обратной стороны подложки. Чем выше напряжение смещения, тем меньше паразитная емкость перехода и меньше время оптического отклика, однако выше и темновой ток. Данный тип PSD имеет худшую точность среди всех типов двухмерных PSD-датчиков (погрешность 3...6%). Чем ближе световое пятно к периметру рабочей поверхности датчика, тем хуже точность определения координат.

Датчик с четырехсторонним расположением электродов и компенсацией нелинейности

Рассмотренный выше тип датчиков имеет только одно преимущество перед датчиками с двухсторонним расположением электродов — он значительно дешевле. Однако точность его недостаточна для многих приложений. Для того, чтобы повысить точность без существенного удорожания конструкции, достаточно сформировать специальную криволинейную активную поверхность и изменить форму электродов. На рисунке 8 показана конструкция такого датчика с компенсацией нелинейности.

Криволинейная рабочая поверхность датчика имеет форму подушечки, отсюда и название pincushion (подушечка для булавок). Фигурная форма электродов обеспечивает компенсацию искажений сигнала вблизи периметра. Напряжение смещения подается точно так же, как и для обычного четырехстороннего (tetralateral) PSD-датчика, однако погрешность снижается до 1%.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ PSD

- PSD-датчики применяются для:
- позиционирования головок самонаведения ракет и снарядов;
 - позиционирования лазерных головок чтения-записи в приводах CD-ROM;
 - систем технического зрения роботов;
 - охранных систем;
 - систем позиционирования сборочного и измерительного оборудования;
 - мониторинга движущихся объектов;
 - мониторинга биообъектов;
 - определения формата листа в копировальной и печатной аппаратуре;
 - измерения расстояний и отклонений;

— оптических гироскопов видеокамер;

— геодезических измерений.

Преимущества PSD реализуются в полной мере в тех случаях, когда требуется обеспечить слежение (мониторинг) за движущимся объектом, не нагружая и не связывая сам объект (или когда объект механически недоступен). Измерения в этом случае будут более точными и не будут искажены присутствием датчика на объекте. Примеры — мониторинг мембран микрофонов и громкоговорителей, измерение давления и направления потока воздуха, измерение ускорений движущихся объектов, определение положения источников радиационных излучений. При помощи PSD-датчиков можно измерять расстояния с разрешением в единицы нанометров, используя для этого простые аналоговые схемы.

ТРИАНГУЛЯРНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ

Триангулярный метод является простым, но очень эффективным для измерения расстояния. Метод особенно эффективен для измерения коротких расстояний с большой точностью. Измерительное устройство (см. рис. 9) содержит лазерный излучатель (светодиодный или газовый) и фотодетектор с оптикой. В качестве фотодетектора может быть использована ПЗС-камера или PSD-датчик. Лазерный источник проецирует на объект световой луч. Часть светового потока, отражаясь от объекта, проходит через объектив датчика и попадает на активную поверхность фотодатчика. В зависимости от расстояния до объекта меняется и угол падения отраженного луча на поверхность датчика. Этот угол и определяет местоположение светового пятна на активной поверхности датчика (см. рис. 10). Базовые расстояния внутри оптической системы известны и путем несложных вычислений рассчитывается расстояние до объекта. Диапазон и точность измерения определяются в основном характеристиками датчика, оптической системы и мощностью лазерного источника. Точность измерения зависит также от текстуры отражающей поверхности, поскольку форма светового пятна может сильно искажаться при отражении от поверхности со сложной текстурой, например, дерева. Однако если использовать сигнальные процессоры для оптической фильтрации, а также метод синхронного детектирования, то с

помощью PSD-датчиков можно решать очень трудные задачи, например, измерять расстояния в области сварочной дуги.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДИОДА PSD

При увеличении интенсивности светового потока, падающего на поверхность датчика, может произойти насыщение и потеря чувствительности. При очень больших интенсивностях светового потока может произойти даже локальное разрушение активного слоя датчика. Рабочая температура поверхности датчика не должна превышать 100°C . Для того, чтобы избежать раннего насыщения, на структуру PSD должно быть подано как можно большее напряжение смещения. Максимальное напряжение смещения для отдельных типов PSD-датчиков может достигать 35...110 В. Однако при большом напряжении смещения резко увеличивается темновой ток. Поэтому напряжение смещения следует ограничивать величиной, при которой сохраняется достаточно малый темновой ток.

Нелинейность определения положения светового пятна вычисляется как абсолютная ошибка положения, деленная на длину самого детектора.

Значения нелинейности для разных типов PSD-датчиков:

- 0,05% — для одномерных;
- 0,3% — для двухсторонних (duolateral);
- 2...3% для четырехсторонних (tetralateral) PSD;
- 1% для четырехсторонних PSD с коррекцией нелинейности (pincushion).

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И РАЗРЕШЕНИЕ PSD-ДАТЧИКОВ

Во всех PSD-датчиках измеряется положение «центра массы» светового пятна. Датчики способны обеспечивать разрешение до единиц нанометров, а их быстродействие может достигать 100 нс. Датчики могут обеспечивать точность измерения в пределах 0,1%, причем в диапазоне изменения интенсивности светового потока в десятки раз! Если же использовать калибровку и табличное хранение матрицы коррекции, то можно повысить точность измерения на один и даже два порядка. Как правило, дополнительно используемая оптика (объектив и фильтры) вносит определенную статическую погрешность в результаты измерения. Поэтому обязательно применяется таб-

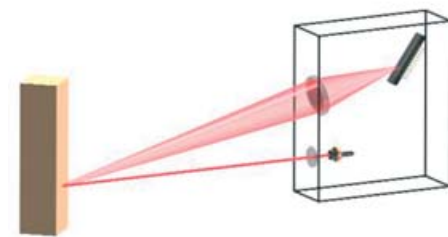


Рис. 9. Триангуляционный метод измерения

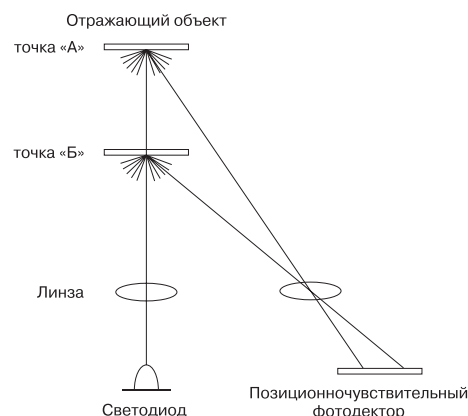


Рис. 10. Триангулярный оптический метод измерения расстояния

личная калибровка всей системы. Корректирующая матрица поправочных коэффициентов хранится в памяти встроенного контроллера измерительной системы. Для повышения точности измерения могут использоваться модулированные источники света.

Рабочая поверхность PSD-датчиков может иметь любую форму. Например, для двух- и трехмерных угловых измерений применяются PSD-датчики, имеющие форму круга, спирали, и даже сферы. Для контроля поверхностей могут использоваться также массивы PSD-датчиков.

СОПРЯЖЕНИЕ С PSD-ДАТЧИКАМИ

Схема сопряжения обеспечивает усиление токовых сигналов и преобразование их в сигналы напряжения. Далее может использоваться как аналоговый, так и цифровой сигнал. Для преобразования в цифровую форму используются многоканальные 12...16-разрядные АЦП. Сигналы напряжения должны соответствовать рабочему диапазону АЦП. Токи, протекающие в структуре PSD, очень малы. Поэтому непосредственно рядом с датчиком должны быть установлены предварительные усилители, которые могут

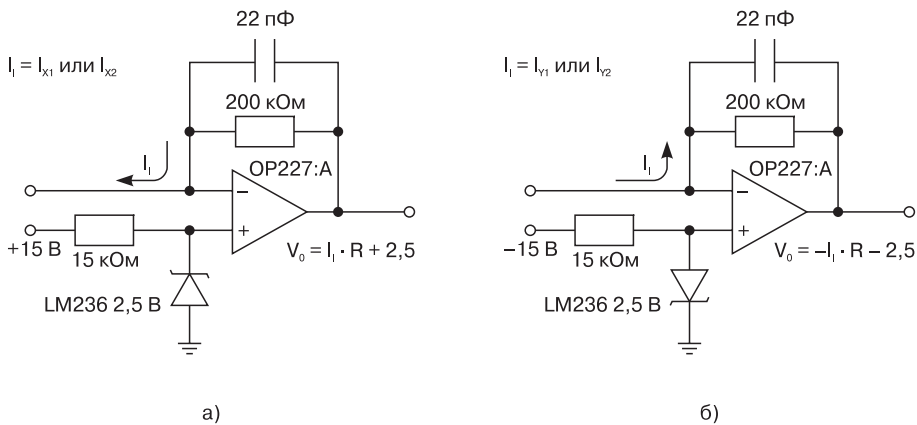
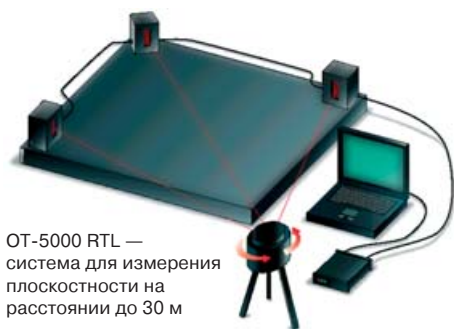


Рис. 11. Схемы предварительного усилителя для PSD-датчика. Варианты схем: а) для смещения +2,5 В; б) для смещения -2,5 В



OT-5000 RTL — система для измерения плоскостности на расстоянии до 30 м

Рис. 12. Мониторинг плоскостности платформы с помощью системы OT-5000RTL

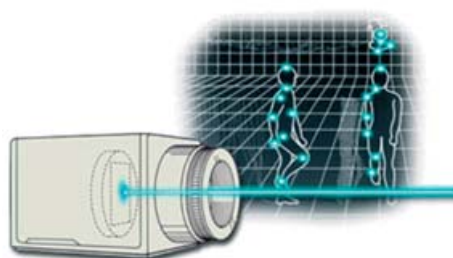


Рис. 13. Система слежения за перемещением объектов на основе PSD-датчиков

обеспечивает мониторинг и измерение плоскостности платформы площадью несколько сот квадратных метров. Система состоит из сканирующего лазера, трех оптических PSD-датчиков и компьютерного терминала. Луч вращается со скоростью около 1000 об/мин. Точность измерения и разрешающая способность подобных систем — 0,025 мм в радиусе 30 м. Производитель — фирма ON-TRAK Photonics, Inc. (www.ontrak.com), Калифорния.

На основе PSD-датчиков создают оптические системы, которые предназначены для выравнивания и юстировки лопаток турбин самолетов, электростанций. Разработаны и эксплуатируются опорные оптические системы для сборки самолетов, выравнивания фундаментов прецизионного оборудования, юстировки вращающихся плоскостей и т.д.

Система слежения за перемещением биобъектов

На рисунке 13 показан принцип работы системы слежения за перемещением тела наблюдаемого пациента.

На теле пациента закреплены опорные инфракрасные светодиоды, которые включаются поочередно. Пациент перемещается в поле зрения камеры, состоящей из ИК-фильтра, объектива и двухмерного PSD-датчика. Синхронно с переключением светодиодов производится и обработка и вычисление координат каждой опорной точки. Информация поступает в компьютер. В памяти компьютера запоминаются треки движения точек, которые характеризуют динамику движения частей тела пациента. Такие системы могут использоваться, например, в спортивной элитной медицине.

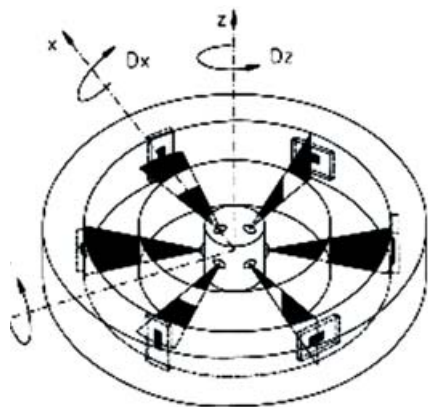


Рис. 14. Принцип работы оптоэлектронной измерительной системы



Гирскопический оптический датчик на основе PSD

На рисунке 14 показана разработанная фирмой 3D Connexion (<http://www.3dconnexion.com/>) оптическая система, которая выполняет функцию гироскопа. В данной системе, в отличие от обычного гироскопа, нет вращающихся и массивных деталей. Система определяет положение подвижной (подвешенной на пружинах) части относительно неподвижной опоры. Стабилизация может обеспечиваться приводами на основе электромоторов или соленоидов.

Вдоль окружности установлены 6 светодиодов. Подвижная часть в виде кольца и круглая часть с платой

быть выполнены по схемам, приведенным на рисунке 11.

Следует учесть, что для получения высокой точности нужно использовать прецизионные резисторы (0,01%), а усилители должны иметь малый дрейф и напряжение смещения. Печатный монтаж должен обеспечивать малые токи утечки.

Некоторые типы PSD-датчиков уже имеют встроенные усилители и даже встроенные АЦП и сигнальный процессор. Программа, «зашитая» в сигнальный процессор, позволяет нормировать сигналы, производить вычисление по формулам и запоми-

нать значения вычисленных координат, а также сравнивать их с заданными порогом. Такие датчики имеют и цифровой последовательный интерфейс, который обеспечивает простое сопряжение датчиков с управляющим микроконтроллером.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ PSD

Оптическая система для мониторинга плоскостности объектов

На рисунке 12 показана оптическая измерительная система, которая

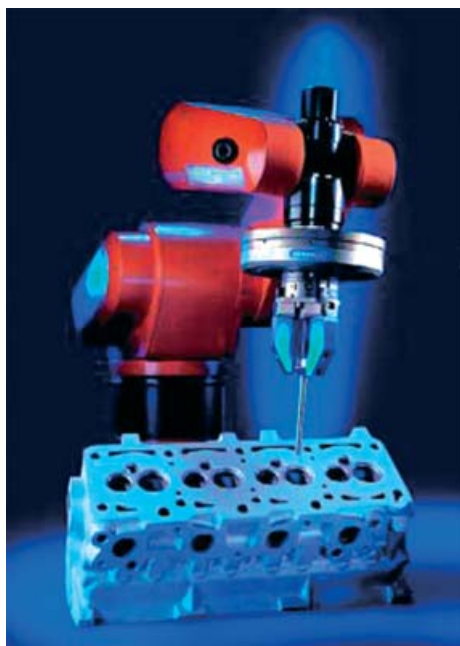


Рис. 15. Использование 3D-PSD-датчика для интеллектуального сверлильного станка

электроники соединены между собой тремя пружинами. При повороте системы на некоторый угол за счет определенной инерционности происходит поворот плоскости опорных лучей, формируемых светодиодами, относительно плоскостей 6 PSD-фотодатчиков. Датчики одномерные, но очень точные. Микроконтроллер рассчитывает абсолютные и относительные смещения и в соответствии с заложенной программой вычисляет перемещение. Рисунок 15 иллюстрирует использование подобной гироскопической системы для определения положения головки сверлильного станка-робота.

Стабилизатор объектива видеокамеры

Сотрясение видеокамеры в процессе съемки приводит к смазыванию изображения. Использование системы гироскопической оптической стабилизации изображения позволяет свести к минимуму этот неприятный эффект. На рисунке 16 показана структура объектива видеокамеры Canon с гироскопической системой стабилизации.

Для компенсации перемещения объектива стабилизатор изображения сдвигает группу линз объектива в плоскости, параллельной пленке таким образом, чтобы ось прохождения лучей света через объектив оставалась неподвижной. Перемещения камеры улавливаются двумя гироскопическими сенсорами. Сенсоры

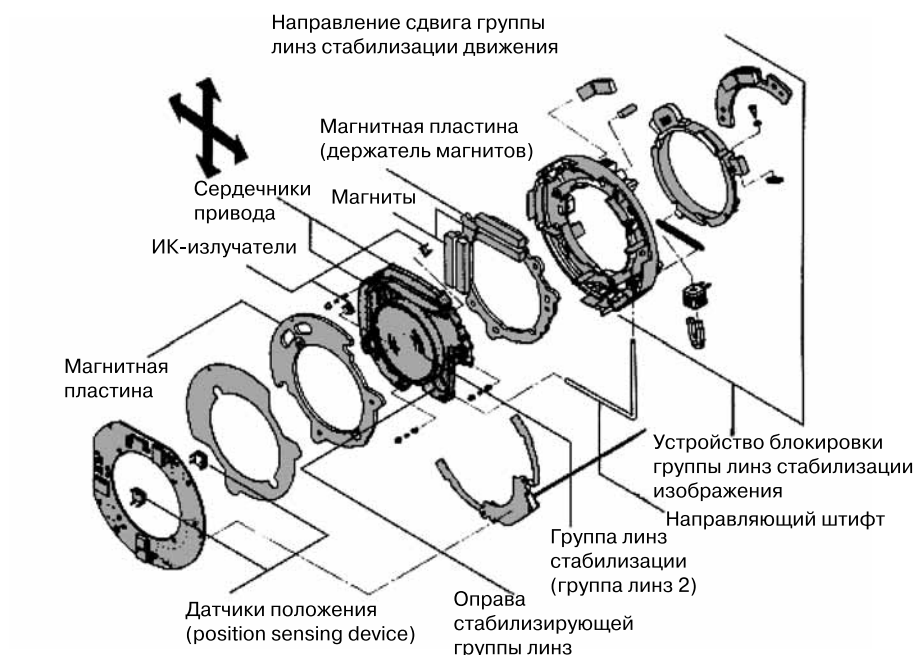


Рис. 16. Структура объектива видеокамеры с гироскопической системой стабилизации

определяют направление (угол) и скорость перемещения (дрожания) камеры с объективом. Группа линз блока стабилизации может перемещаться посредством соленоида. Положение блока стабилизации определяется при помощи инфракрасных светодиодов, установленных в оправе блока, и PSD-датчиков определения положения, расположенных на плате электроники. Микроконтроллер преобразует сигналы гиросенсоров в команды управления, по которым устройство стабилизации смещает группу линз.

ПРОИЗВОДИТЕЛИ PSD-ДАТЧИКОВ И ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ИХ ОСНОВЕ

В настоящее время PSD-датчики производят многие фирмы во всех странах мира. Самые крупные и известные производители — японские фирмы Hamamatsu и Sharp. Кроме них, PSD-датчики и готовые оптические измерительные системы на их основе производит множество небольших американских фирм. Основные потребители PSD-датчиков — производители копировальной и печатной техники, военного оборудования, геодезических оптических приборов, недорогих лазерных рулеток, охранных систем, медицинского и спортивного оборудования.

Основные производители PSD-датчиков:

- Hamamatsu (Япония), www.hamamatsu.com;
- Sharp (Япония), www.sharp.com;
- On-TRAK Photonics, Inc. (США, Калифорния), www.on-trak.com;
- UDT Sensors, Inc. (США, Калифорния), www.udt.com;
- Sitek, Inc. (Швеция), www.sitek.se.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ РАССТОЯНИЯ ФИРМЫ SHARP

Фирма Sharp является одним из ведущих производителей PSD-датчиков. На примере номенклатуры датчиков рассмотрим типовые конструкции и схемотехнику интегральных датчиков расстояния. На рисунке 17 показана конструкция интегрального датчика расстояния, который содержит в одном корпусе PSD-фотодиод, светодиодный излучатель и схему вычисления расстояний. Датчики такого типа используются, например, в качестве детекторов положения рабочих частей электромеханических устройств или в

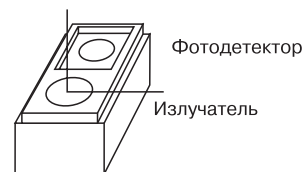


Рис. 17. Конструкция PSD-датчика

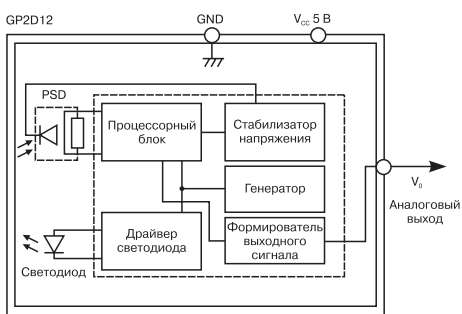


Рис. 18. Датчик расстояния с аналоговым выходом

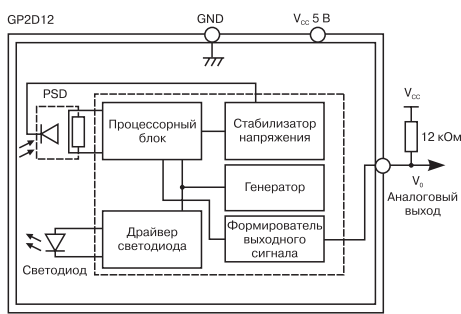


Рис. 19. Датчик расстояния с цифровым выходом

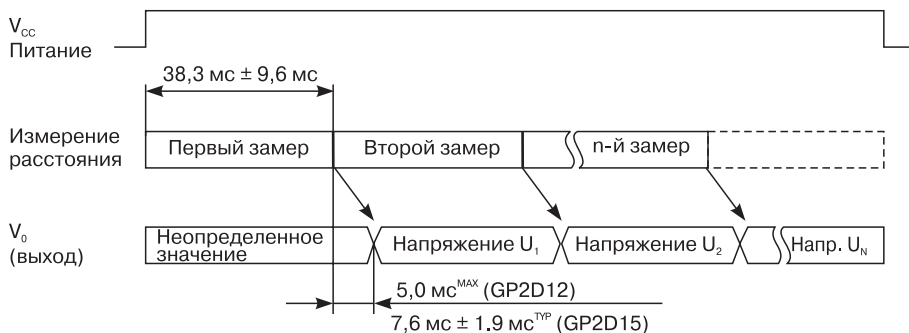


Рис. 20. Диаграмма выходных сигналов датчиков GD2D12 и GD2D15

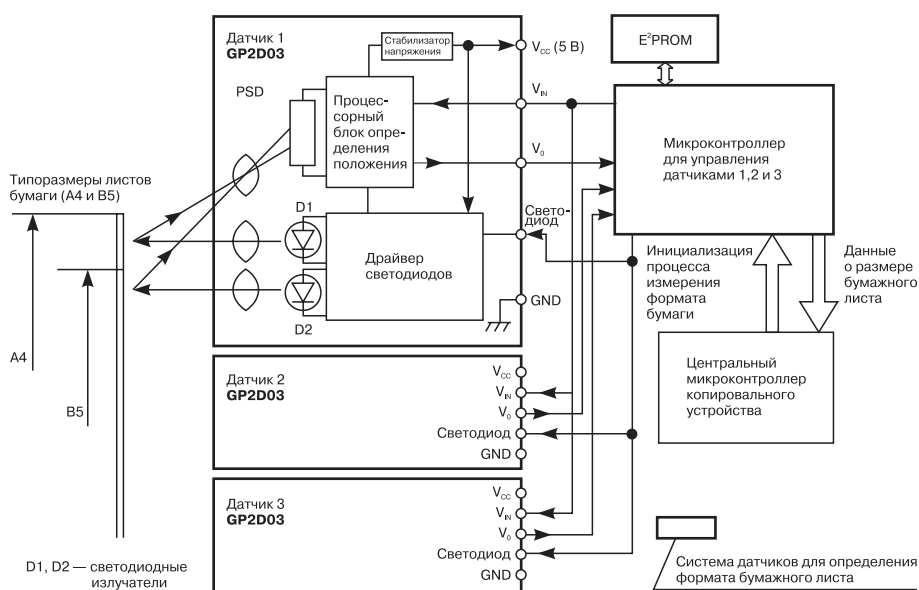


Рис. 21. Принцип работы системы датчиков для определения формата бумажного листа в принтере

качестве датчиков положения бумаги в принтерах и ксероксах.

Интегральные датчики могут содержать схему преобразования положения отраженного светового луча в аналоговый или в цифровой код расстояния до объекта. На рисунке 18 показана структурная схема интегрального PSD-датчика с

аналоговым выходом, которая содержит:

- PSD-фотодиод;
- лазерный светодиод с фокусирующей встроенной линзой;
- процессорный модуль преобразования сигнала PSD в аналоговые значения, пропорциональные расстоянию до объекта;

- источник опорных напряжений;
- синхрогенератор для тактирования процессорного модуля и стробирования лазерного светодиода.

Устройство такого типа могут использоваться для слежения за нахождением объекта в определенном диапазоне расстояний. Аналоговые значения далее могут поступать на компаратор напряжения или же на вход АЦП.

На рисунке 19 показана структура датчика расстояния с цифровым выходом. Его отличие от датчика с аналоговым выходом состоит в наличии формирователя цифрового кода, пропорционального расстоянию до объекта.

На рисунке 20 показаны временные диаграммы выходных сигналов цифрового PSD-датчика. Измерения производятся циклически сразу после подачи рабочего напряжения. Каждый цикл измерения расстояния занимает около 45 мс.

На рисунке 21 показан пример использования PSD-датчиков Sharp в принтере для автоматического определения положения и размера бумажного листа, поступающего из подающего лотка принтера. Применяются три отдельных PSD-датчика, данные с которых считываются управляющим контроллером. В EEPROM хранятся табличные калибровочные данные для датчиков. Микроконтроллер анализирует поступающие данные и определяет положение края бумаги и размер бумажного листа.

ЛИТЕРАТУРА

1. 2-D Optical Position. Roger Johnson u Chris Lentz. CIRCUIT CELLAR Issue 152 March 2003, www.circuit-cellar.com.
2. GP2D02/05 Sharp. Application Note/ August 10. 1995.
3. Optical strain sensor using median density grating foil: Rivaling the electric strain gauge. Bing Zhao, Huimin Xie, and Anand Asundi School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 20 September 2000.
4. Optical Coordination Sensor for Precision Cooperating Robots. Wing-Choi Ma.
5. Electrical and Computer Engineering Carnegie Mellon University, Alfred A. Rizzi and Ralph L. Hollis The Robotics Institute Carnegie Mellon University.
6. Infrared Position Sensing Modules. ON-TRAK Photonics, Inc.