



Времяпролётные сенсоры для роботов и не только

Андрей Антонов (г. Волгоград)

В статье представлена времяпролётная (Time-of-Flight) технология оптических сенсоров, применяемая при создании дальнометров и камер глубины, широко используемых в роботах, промышленных системах машинного зрения и сканирования объектов, а также приложениях дополненной и виртуальной реальности, в том числе и в мобильных устройствах. Представлена современная элементная база и модули, имеющиеся на рынке. Приведены рыночные перспективы технологии.

Методы сканирования пространства

В последнее десятилетие наблюдается значительный интерес к разработке устройств и систем для сканирования пространства. Возможность дистанционного измерения расстояний бывает часто востребована в задачах картирования и разведки с борта наземных транспортных средств, воздушных судов, космических кораблей и искусственных спутников как в гражданских, так и в военных целях.

Американское космическое агентство НАСА технологию сканирования пространства называет ключевой в реализации возможности автономного и точного перемещения по поверхностям планет и других объектов в космосе как в роботизированных, так и в пилотируемых миссиях [1]. Различные виды сканирующих сенсоров используются в компьютерной графике и системах машинного зрения для моделирования трёхмерных объектов. Схожие технологии применяются в задачах измерения рельефа местности, одновременной локализации и построения карты

(технология SLAM), автономном и полуавтономном управлении автомобилем (включая обнаружение препятствий), а также для захвата и манипулирования объектами в промышленных роботах. Помимо этого, в области машинного зрения измерители расстояний повсеместно используются в ряде приложений для распознавания объектов, захвата движения (Motion Capture), реализации человеко-машинных интерфейсов и трёхмерного воссоздания пространства [2].

Существует несколько физических принципов и связанных с ними технологий, используемых при разработке датчиков расстояния. Одним из типов измерителей расстояний является так называемый LIDAR. Это аббревиатура образована от слов «Light Imaging Detection And Ranging» или «Light and raDAR». LIDAR представляет собой технологию дистанционного зондирования для оценки расстояния (дистанции, глубины) путём облучения объекта коллимированным лучом лазера, а затем получения отражённого излучения на фотодетектор. Этот прин-

цип измерения расстояний известен как измерение времени пролёта (Time-of-Flight, TOF). Поскольку LIDAR используют тонкий сфокусированный лазерный луч, они позволяют получать оценку дистанции с очень высокой точностью. В этих измерительных приборах используется свет в ультрафиолетовом, видимом или инфракрасном диапазонах. LIDAR позволяют измерять металлические и неметаллические поверхности, камень, растения, облака и так далее, за исключением, пожалуй, материалов с высокой отражающей способностью (зеркала, которые могут перенаправить импульс в сторону от фотодетектора) или же, наоборот, с высокой поглощающей способностью (в этом случае отражённый сигнал не вернётся на фотодетектор).

Примером простой времяпролётной системы является однопиксельная система, как правило, состоящая из модулируемого лазера с коллиматором, выступающего в качестве излучателя и единственного фотодиода, служащего приёмником (см. рис. 1) [3]. Излучаемый в инфракрасном диапазоне сигнал (на рисунке показан красным) отражается от поверхности объекта и сенсор детектирует отражённый компонент.

Существует два способа измерения времени пролёта [4] и два соответствующих им типа сенсоров:

1. Импульсные камеры непосредственно измеряют промежуток времени между моментом излучения импульса и получением отражённого сигнала. Длительность импульса составляет несколько наносекунд. Поскольку интенсивность импульса значительно превышает этот показатель у фоновой засветки, этот тип времяпролётных камер может использоваться вне помещений, при неблагоприятных условиях. Данный способ позволяет произво-

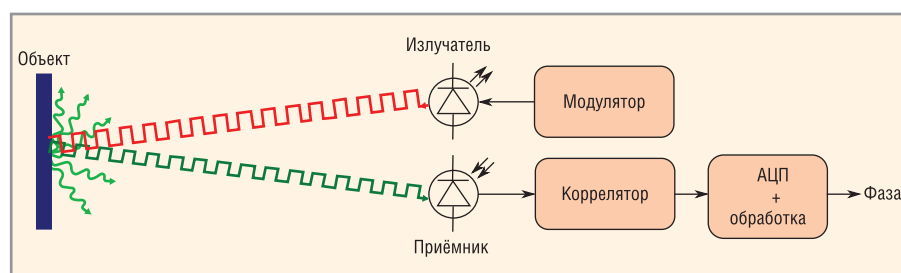


Рис. 1. Однопиксельная времяпролётная система

дить измерения больших дистанций (от нескольких метров до нескольких километров). Основой фотодетекторов служат однофотонные лавинные диоды (SPAD), благодаря их способности фиксировать момент попадания единичных фотонов с высокой точностью – порядка 10 пс.

2. Модулирующие излучение датчики непрерывной волны измеряют фазовый сдвиг между эмитированным непрерывным синусоидальным сигналом и зафиксированными каждым из фотодетекторов отражёнными сигналами. Для оценки фазового сдвига используется кросс-корреляция (демодуляция). Фаза непосредственно связана с расстоянием через известную частоту модуляции. В отличие от предыдущего способа, здесь мы наблюдаем косвенную оценку расстояния. Такие датчики используются, как правило, внутри помещений и позволяют производить только измерения небольших расстояний (от нескольких сантиметров до нескольких метров). Одним из основных недостатков этого типа камер глубины является неоднозначность свёртывания фазы [5]. Фазовый сдвиг вычисляется из отношения между значениями четырёх электрических зарядов, как показано на рисунке 2.

Четырёхфазные управляющие сигналы имеют 90-градусную задержку по фазе по отношению друг к другу. Четыре результирующих значения электрических зарядов, получаемых с сенсора, используются для оценки фазового сдвига t_d :

$$t_d = \arctg\left(\frac{Q_3 - Q_4}{Q_1 - Q_2}\right),$$

где $Q_1 - Q_4$ представляют электрические заряды для управляющих сигналов $C_1 - C_4$ соответственно. Расстояние d может быть затем вычислено с помощью значения c (скорости света) и f (частоты сигнала):

$$d = \frac{c \cdot t_d}{2f}$$

Здесь значение $c/(2f)$ представляет собой максимальное расстояние, которое может быть измерено однозначно.

В подавляющем большинстве приложений требуется массив данных с информацией о глубине сцены (расстояний до точек на объектах в исследуемой области), а не единственное значение расстояния. Таким образом, технология LIDAR должна быть дополнена

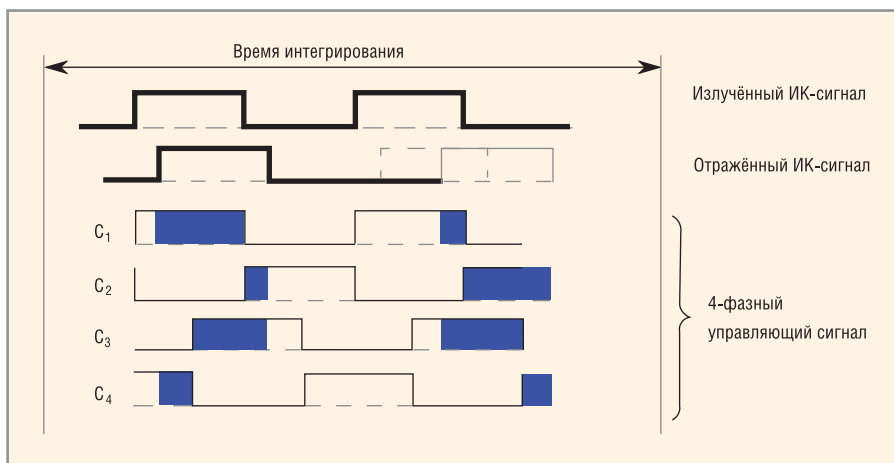


Рис. 2. Вычисление расстояния по фазовым сдвигам

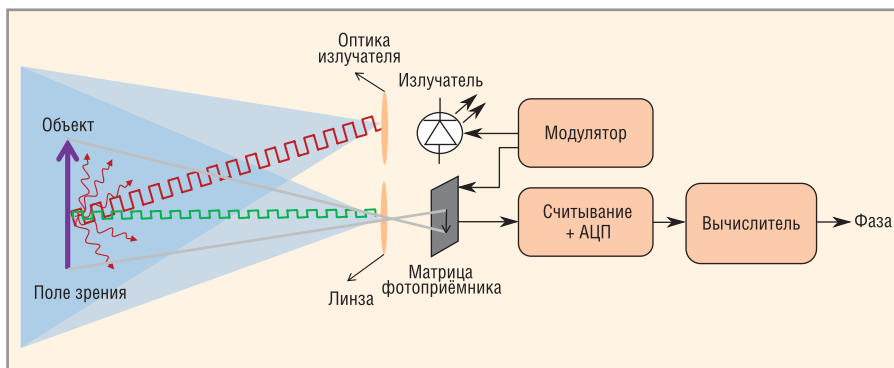


Рис. 3. Принцип действия времяпролётной камеры

технологией сканирования, например, вращающимся зеркалом для получения строки выровненных по горизонтали значений. Значения по вертикали могут быть получены с использованием двух соосных вращающихся зеркал с использованием нескольких лазерных излучателей с собственными фотодетекторами, или же с использованием зеркал с фиксированной ориентацией [6]. Во всех случаях техническая реализация накладывает ограничения на вертикальное поле зрения и разрешение по вертикали. В качестве альтернативы сканирующих устройств можно предложить устройство без сканирования, в котором свет от единственного излучателя расходился бы таким образом, чтобы освещалась вся интересующая нас область пространства, а отражённый свет проецировался бы на двумерный массив фотодетекторов, а именно на времяпролётную камеру глубины. Вместо измерения интенсивности окружающего света, как это происходит в обычных оптических камерах, времяпролётные камеры измеряют отражённый свет, исходящий от собственного излучателя камеры. Принцип действия времяпролётной камеры показан на рисунке 3.

Обычно времяпролётные камеры не имеют отдельных АЦП и блоков обработки для каждого пикселя. Аналоговые данные в пиксельном массиве считываются, а затем обрабатываются, в отличие от однопиксельных систем, в различные моменты времени.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БАЗА

Датчик расстояния VL53L0X (STMicroelectronics)

Это самый маленький времяпролётный сенсор на рынке из представленных на текущий момент решений. Это готовое решение включает в себя инфракрасный, безопасный для глаз лазер, оптический фильтр для увеличения помехозащищённости и массив светочувствительных элементов для детектирования фотонов.

Основные характеристики:

- точность измерения – до 1 мм;
- максимальная дистанция – до 2 м;
- длина волны излучателя – 940 нм;
- время измерения – до 30 мс;
- частота получения данных – 50 Гц;
- энергопотребление – 5 мкА (ожидание), <20 мВт (измерение);
- температурный диапазон –20...+70°C;
- размеры корпуса – 4,4 × 2,4 × 1 мм.



Рис. 4. Датчик расстояния VL53L0X



Рис. 6. CamBoard Nano

Применение:

- реализация быстрого автофокуса и карты глубины в фото/видеокамерах;
- определение пользователя с целью энергосбережения в смартфонах и ноутбуках;
- управление жестами;
- БПЛА;
- робототехника и управление в промышленности;
- Интернет вещей;
- бытовая техника.

Датчик VL53L0X является высокоинтегрированным решением и содержит массив однофотонных лавинных диодных детекторов, 940-нм лазерный излучатель (Class 1 безопасности), фильтр, снижающий влияние внешней засветки и встроенный микроконтроллер, который позволяет получить на выходе датчика сразу расстояние до препятствия в миллиметрах, даже в сложных условиях эксплуатации (влажность, пыль) и вне зависимости от отражательной способности объекта.

Внешний вид модуля представлен на рисунке 4, а его структурная схема – на рисунке 5 [7].

Для упрощения процесса знакомства с модулем компания STMicroelectronics выпускает комплект с платой расширения X-NUCLEO-53L0A1 для использования совместно с оценочной платой STM32 F401RE Nucleo.

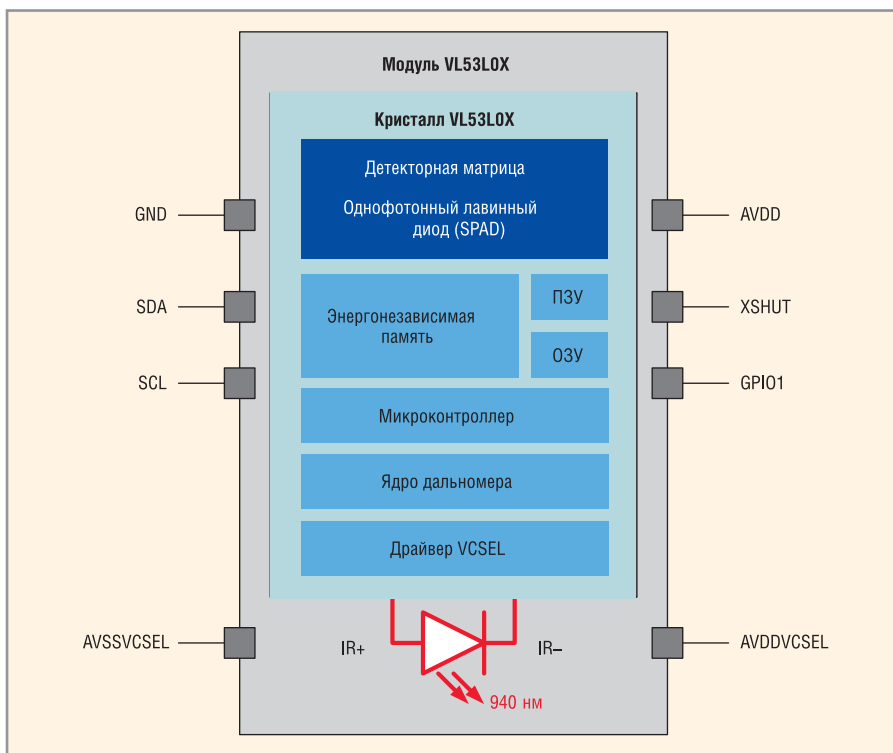


Рис. 5. Структурная схема VL53L0X

Оптический сенсор PhotonICs 19k-S3 (PMD)

Первый коммерчески доступный чип для реализации трёхмерной времяпролётной системы. Этот оптический сенсор позволяет захват расстояния и монохромного изображения в реальном времени при скорости чтения данных до 15 Мп/с, работая как внутри помещений, так и на улице. Разрешение 160 × 120 пикселей оптимизировано для реализации человеко-машинных интерфейсов на расстояниях до 2 м [8].

Основные характеристики:

- размер пикселя – 45 × 45 мкм;
- частота модуляции – до 80 МГц;
- скорость чтения – до 15 Мп/с;
- энергопотребление – 175 мВт;
- напряжение питания – 5 В;
- логические уровни ТТЛ или КМОП;
- температурный диапазон –40...+85°C;
- корпус – TLCC40 12 × 12 × 1,9 мм.

Применение:

- человеко-машинные интерфейсы для ноутбуков, мобильных устройств и автомобильной электроники;
- игры и потребительская электроника;
- внутрисалонные автомобильные интерфейсы;
- автоматизация производств;
- мобильные роботы;
- видеоинформационные системы (Digital Signage);
- системы видеонаблюдения и безопасности;

- медицинское и спортивное оборудование.

В качестве отладочного комплекта компания PMD предлагает продукт под названием CamBoard Nano (см. рис. 6). Это готовое решение на базе датчика PhotonICs 19k-S3 представляет собой камеру глубины с размерами всего 37 × 30 × 25 мм, которая выдаёт до 90 кадров/с с разрешением 160 × 120 пикселей и с областью обзора 90 × 68°. Устройство оснащено интерфейсом USB 2.0 и поставляется вместе с ПО для обработки и визуализации данных. Поддерживает работу с API в ОС Linux и Windows, также имеется программный интерфейс для MATLAB.

Времяпролётный сенсор OPT8241 (Texas Instruments)

На базе этого сенсора, совместно с контроллером OPT9221, можно построить 3D времяпролётную камеру с разрешением 320 × 240 пикселей [9].

Основные характеристики:

- размер пикселя – 15 × 15 мкм;
- частота кадров – до 150 кадров/с;
- частота модуляции – до 100 МГц;
- напряжение питания – 3,3 В;
- логические уровни ТТЛ или КМОП;
- температурный диапазон 0...+70°C;
- корпус COG-78 с размерами 8,8 × 7,9 × 0,7 мм.

Применение:

- измерение местоположения и приближения;

- 3D-сканирование;
- 3D-системы машинного зрения;
- мобильные роботы;
- безопасность и видеонаблюдение;
- управление жестами;
- системы дополненной и виртуальной реальности.

Блок-схема реализации 3D время-пролётной камеры на базе сенсора OPT8241 и контроллера OPT9221 представлена на рисунке 7.

ВРЕМЯПРОЛЁТНАЯ КАМЕРА DEPTHSENSE DS541 ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (SOFTKINETIC)

Модуль самой маленькой на сегодняшний день времяпролётной камеры был анонсирован компанией SoftKinetic в конце сентября 2016 г. [10]. Насколько это маленькое устройство можно видеть на рисунке 8. Из технических деталей пока известно, что пиксель её четвертьдюймового сенсора имеет размер 10 мкм, модуль может работать как в помещениях, так и на улице, и имеет MIPI-интерфейс. Появление камеры в свободной продаже планируется в 3 квартале 2017 г. Сейчас же инженерные образцы модуля DS541 для перспективных разработок можно заказать у производителя.

РЫНОЧНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

В таблице приведено сравнение времяпролётной технологии с другими популярными оптическими 3D-технологиями: стереозрением и технологией структурного света.

Времяпролётная технология имеет преимущества благодаря более простым программным алгоритмам, быстрому системному отклику, хорошим показателям в условиях сильной и слабой освещённости, умеренной стоимости и компактности решений, а также высокой точности при определении глубины. Эта технология может быть использована в большинстве приложений, включая игры, 3D-сканирование пространства, в пользовательских интерфейсах и дополненной реальности.

Исследование, проведённое Allied Market Research [11], показывает, что наиболее используемой является технология стереозрения, и такие 3D-камеры, как ожидается, будут преобладать на рынке в ближайшие 5 лет, но доля времяпролётных камер будет расти (см. рис. 9).

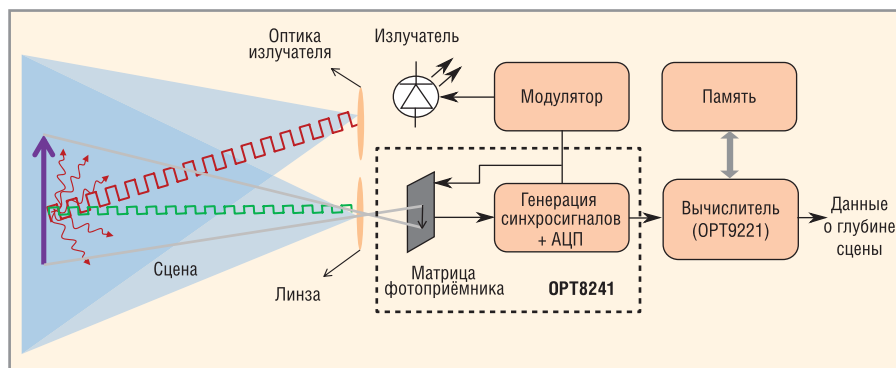


Рис. 7. Блок-схема времяпролётной 3D-камеры на базе чипсета TI

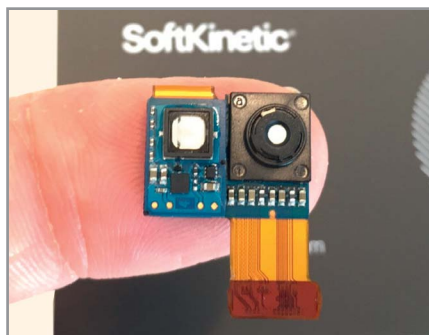


Рис. 8. Камера SoftKinetic DS541

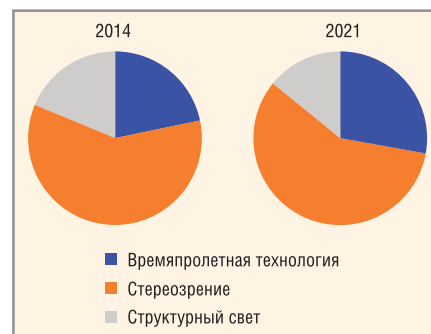


Рис. 9. Динамика рынка технологий 3D-камер

Популярные оптические 3D-технологии

Факторы	Стереозрение	Структурный свет	Времяпролётная технология
Сложность ПО	Высокая	Средняя	Низкая
Материалоёмкость	Низкая	Высокая	Средняя
Компактность	Средняя	Низкая	Высокая
Время отклика	Среднее	Медленное	Быстрое
Точность измерения глубины	Низкая	Средняя	Высокая
Характеристики при низкой освещённости	Удовлетворительные	Хорошие	Хорошие
Характеристики при сильной засветке	Хорошие	Удовлетворительные	Хорошие
Энергопотребление	Низкое	Среднее	Масштабируется
Рабочий диапазон	Ограничен	Масштабируется	Масштабируется
Применения			
Робототехника	+	+	+
Игры	-	+	+
3D-фильмы	+	-	-
3D-сканирование	-	+	+
Управление интерфейсом пользователя	-	-	+
Дополненная реальность	+	-	+

ЛИТЕРАТУРА

1. Amzajerdian F., Pierrottet D., Petway L., Hines G. and Roback V. Lidar Systems for Precision Navigation and Safe Landing on Planetary Bodies. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. 2011. P. 819.
2. Horaud Radu, Hansard Miles, Evangelidis Georgios, Clement Menier. An Overview of Depth Cameras and Range Scanners Based on Time-of-Flight Technologies. Machine Vision and Applications Journal. 2016. <10.1007/s00138-016-0784-4>.
3. SBAU219D. Introduction to the Time-of-Flight (ToF) System Design. Texas Instruments. 2014.
4. Remondino F., Stoppa D. TOF Range-Imaging Cameras. Springer. 2013.
5. Hansard M., Lee S., Choi O., Horaud R. Time-of-Flight Cameras: Principles, Methods and Applications. Springer. 2013.
6. Антонов Андрей. Сканирующие лазерные дальнометры (LIDAR). Современная электроника. 2016. №1. С. 10–15.
7. www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/v15310x.html.
8. www.pmdtec.com.
9. SBAS704B. OPT8241 3D Time-of-Flight Sensor. Texas Instruments. 2015.
10. www.softkinetic.com.
11. www.alliedmarketresearch.com/world-3D-Camera-market.