

Лазерные системы для управления транспортными средствами и робототехникой

Евгений Старовойтов (Московская обл.)

В обзоре рассказывается о лазерных измерительных системах, которые могут использоваться для управления различными транспортными средствами и мобильными роботами. Описаны принципы работы лазерных систем и рассмотрены возможные области их применения в сравнении с системами, работающими на других физических принципах.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе эксплуатации наземных, воздушных или космических транспортных средств и робототехники различного назначения часто возникает необходимость в измерении координат подвижных и статичных объектов, а также получении данных об их форме и ориентации на дистанциях от нескольких десятков километров до долей метра.

Большое значение имеет проведение измерений в условиях значительного уплотнения потока транспортных средств, когда первостепенными требованиями становятся обеспечение безопасности и поддержание заданного режима движения, а также при высоком уровне широкополосных электромагнитных помех.

На сегодняшний день основной проблемой автономных роботов остаётся навигация. Для успешного передвижения робота в пространстве бортовая система управления должна самостоятельно построить маршрут, правильно интерпретировать получаемую информацию об окружающей среде и постоянно отслеживать собственные координаты. Кроме того, устройствам, снабжённым манипуляторами, необходимо позиционировать части своего корпуса для взаимодействия с близлежащими предметами.

СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА

Для измерений могут быть использованы радиотехнические, телевизионные и оптикоэлектронные системы.

Радиотехнические системы эффективны для работы на дистанциях в десятки километров. Они способны «видеть» сквозь облака, туман и осадки вне зависимости от оптических характе-

ристик атмосферы и световой обстановки. На близких дистанциях, соизмеримых с длиной волны зондирующего излучения, надёжное различение и идентификация отдельного объекта будут затруднены. Радиотехнические системы могут быть использованы для создания двумерных (2D) изображений, пригодных для анализа местности и навигации, но их разрешение будет меньше, чем у оптических и телевизионных средств.

В обеспечении системы управления внешней информацией, наряду с приборами, работающими в радиодиапазоне, могут быть использованы *оптикоэлектронные приборы и системы* [1]. В оптическом диапазоне можно получить высокую точность при меньших габаритах и массе приборов.

Телевизионные системы позволяют проводить измерения при известных размерах объекта или по установленным на нём маркерам (мишеням). Дальность ограничивается разрешающей способностью телекамер (десятки метров).

Известны системы стереотелевидения, состоящие из двух телекамер, разнесённых между собой на некоторое базовое расстояние. Точность и дальность стереосистем пропорциональна длине базы между ними, что может делать систему достаточно габаритной.

Использование телевизионных средств ограничивается светотехническими условиями и метеорологической обстановкой. В настоящее время телевизионные камеры не могут быть использованы для измерений на расстояниях в десятки километров. Однако телекамеры видимого и ИК-диапазона (например, пировидиконы) применяются для обнаружения и на-

ведения на объект, а также для получения его 2D-изображения.

Оптикоэлектронные приборы с подсветкой цели используют излучение источника, являющегося частью системы. В качестве источника излучения, как правило, используется лазер или сверхъяркие светоизлучающие диоды.

Светоизлучающие диоды имеют более широкие диаграммы направленности и спектр излучения по сравнению с лазерами, что снижает эффективность спектральной селекции и максимальную дальность обнаружения. Достоинством светодиодов является безопасность для органов зрения человека.

Лазерное излучение, благодаря его направленности и когерентности, позволяет получить уникальные технические характеристики, недостижимые с помощью других источников излучения. Дальность измерения лазерных систем составляет от сотен метров до десятков километров. Кроме того, лазерные приборы позволяют определять оптические характеристики атмосферы, её химический состав, метеосостояние, уровень облачности т.д.

Среди разнообразных лазерных приборов можно выделить лазерные дальномеры, лидары (ладары) и лазерные системы видения.

Лазерные дальномеры [2] – это приборы для измерения расстояния между двумя точками в пространстве и находящимися в них объектами в одном, строго определённом направлении. Лазерные дальномеры, как правило, имеют простую и компактную конструкцию с собственным источником питания. Информация об измеренной дистанции обычно высвечивается в визире дальномера. Некоторые модели могут выдавать информацию в цифровом коде непосредственно в бортовую систему управления. Структурная схема импульсного лазерного дальномера представлена на рисунке 1.

Лазерные системы видения [3] предназначены для формирования изображений удалённых объектов с целью их обнаружения и распозна-

вания в условиях, когда телекамеры видимого и ИК-диапазонов уже неприменимы. Структурная схема лазерной системы видения представлена на рисунке 2.

Лазерные системы видения бывают трёх типов. В системе первого типа лазерный источник излучает в узком угле, а приёмник имеет широкую диаграмму направленности. Изображение формируется последовательным сканированием предметной области в пределах поля обзора. Фотоприёмное устройство (ФПУ) регистрирует непрерывный сигнал, модулированный по интенсивности в соответствии с пространственным распределением коэффициента отражения. Такая система имеет простую конструкцию и малую вероятность ложной тревоги. Недостатком системы первого типа является низкое отношение сигнал/шум.

В системе второго типа излучатель и приёмник имеют одинаковую, узкую диаграмму направленности. Диаграмма приёмника перемещается в пространстве синхронно с зондирующим лучом, что обеспечивает высокое отношение сигнал/шум. Недостатками системы второго типа являются угловое рассогласование между диаграммами направленности при резком изменении расстояния до объекта наблюдения и сложность конструкции.

В системе третьего типа лазер излучает в широком угле, но используется многоэлементный приёмник, например ПЗС-матрица; сканирование отсутствует. Такие системы эффективны при использовании стробирования по дальности (пространственной селекции). В зависимости от обстановки, система может работать в различных режимах: при достаточном уровне естественной освещённости поиск и обнаружение объекта может осуществляться без его подсветки, а опознавание объекта и определение его координат производится с лазерной подсветкой.

Лазерные системы, определяющие координаты и скорости, а также позволяющие получать двумерное или трёхмерное (3D) изображение объекта, называются лидарами (от англ. lidar, light detection and ranging) или ладарами (от англ. ladar, laser detection and ranging). Они представляют собой полноценные оптические локаторы.

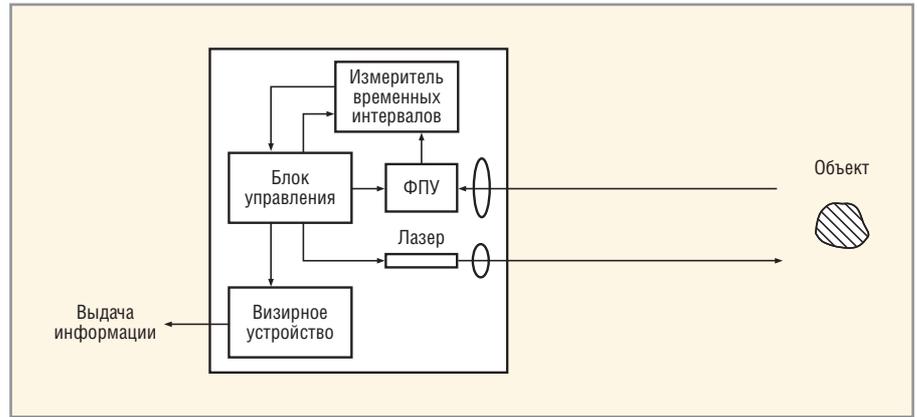


Рис. 1. Структурная схема импульсного лазерного дальномера

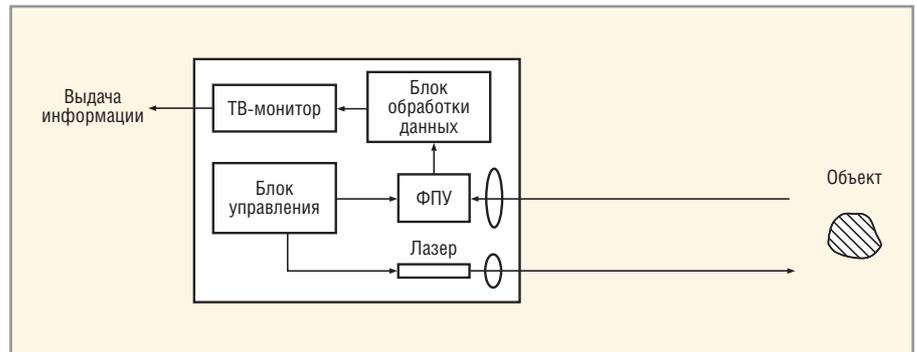


Рис. 2. Структурная схема лазерной системы видения

Исторически первыми были разработаны лазерные системы с непрерывным режимом излучения, однако впоследствии они были вытеснены системами, работающими в импульсном режиме, поскольку в условиях многообразия помех естественного и искусственного происхождения импульсный режим измерений обладает наилучшей точностью показаний и надёжностью.

Импульсный метод основан на измерении времени прохождения t_3 импульса излучения лазера до цели и обратно (см. рис. 3):

$$D = \frac{ct_3}{2}, \quad (1)$$

где $c = 3 \times 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. Точность импульсных дальномеров обычно составляет от единиц до десятых долей метра.

Достоинством импульсных систем является высокое отношение сигнал/шум и возможность стробирования по дальности, т.е. вычисления координат одного из нескольких определённых объектов, расположенных вдоль линии визирования. При этом система отображает только выбранный объект с непосредственно окружающим его участком пространства.

Фазовый метод основан на измерении разности фаз между опорным

зондирующим и отражённым сигналами. Фазовый метод широко используется в высокоточной дальнометрии. Основное уравнение фазовой дальнометрии:

$$D = \frac{\lambda}{2} \left(N + \frac{\phi}{2\pi} \right), \quad (2)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения; N – целое число; ϕ – измеряемая разность фаз ($0 < \phi < 2\pi$). Данный метод позволяет достичь точности измерения в единицы миллиметров. Основной недостаток фазовых систем состоит в неоднозначности результатов измерений.

Неплохую точность демонстрирует метод статистического накопления [4], когда диапазон измеряемых дальностей

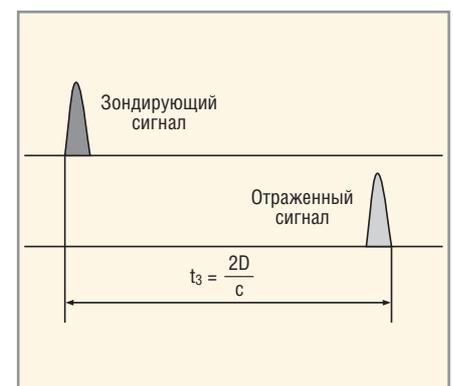


Рис. 3. Принцип импульсного метода измерения дальности

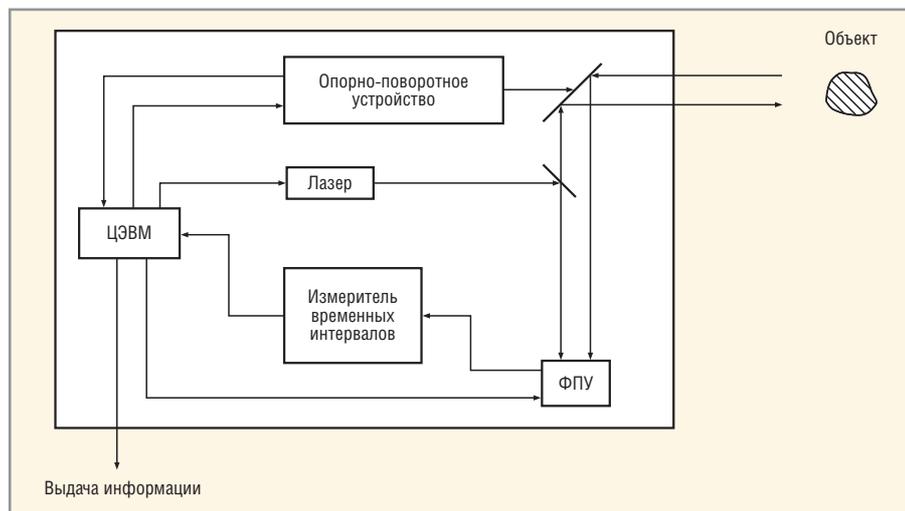


Рис. 4. Структурная схема лазерного сканера

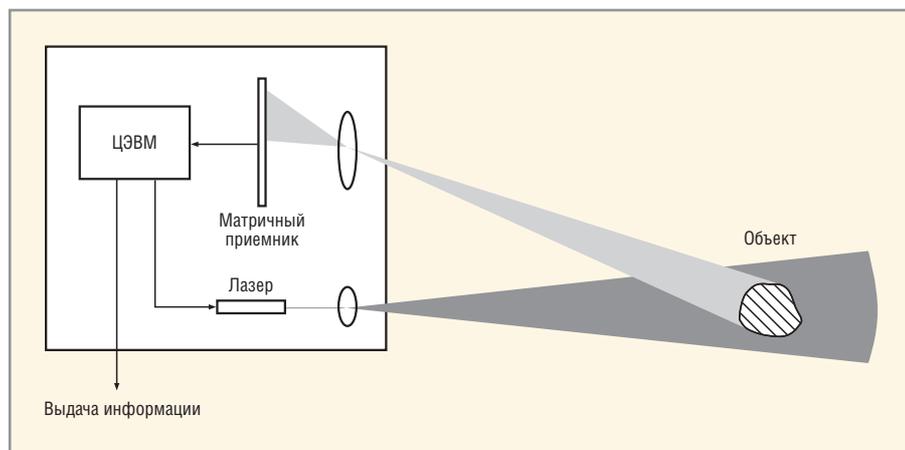


Рис. 5. Структурная схема 3D Flash Ladar камеры

тей ΔD разбивается на m равных интервалов:

$$\Delta d = \frac{\Delta D}{m}, \quad (3)$$

Все интервалы считаются статистически независимыми и рассматриваются как каналы дальности, где происходит обработка (накопление) локационной информации. Считается, что измеряемый сигнал находится в одном из таких каналов. Производится многократное зондирование цели, регистрация принятого сигнала и шума с последующим суммированием сохранённых результатов, после чего производится выдача информации о наличии цели и расстоянии до неё. Точность измерений составляет около 1 м.

Метод статистического накопления эффективен на больших дистанциях измерения, когда требуется высокая точность и приходится использовать зондирующие импульсы малой мощности. С одновременным увеличением максимальной дальности и точности производимых измерений значительно возрастает количество каналов.

В системах с построением 2D-изображения реализуется угломерный способ измерений, основанный на известном размере объекта или его части. Дальность до объекта равна:

$$D = \frac{b}{\text{tg}\omega}, \quad (4)$$

где b – базовое расстояние между двумя точками на поверхности объекта (например, лазерными световозвращателями), ω – угловой размер отрезка b в поле зрения системы.

Точность данного способа ограничена погрешностью определения длины b и углового разрешения прибора. Последняя величина зависит от дискретности матрицы ФПУ и размера поля зрения его отдельных элементов. Недостатком этого способа является необходимость априорного знания точных размеров объекта или установка на него специальных приспособлений для считывания т.н. реперных точек.

Двумерное изображение получают с помощью видеокамер с ПЗС-матрицей. Для получения 3D-изображения основ-

ным средством до недавнего времени являлся сканирующий лазерный дальномер или лазерный сканер. В сканирующих лазерных дальномерах узкий лазерный луч перемещается по угловому рабочему полю с помощью механического устройства сканирования. В каждой точке сканирования выполняется измерение дальности. Синхронно с лазерным лучом может перемещаться и узкое поле зрения приёмника. Достоинством механического сканирования является его высокая помехозащищённость. Структурная схема лазерного сканера представлена на рисунке 4.

Альтернативой лазерному сканеру является 3D-камера с лазерной подсветкой (3D Flash Ladar) [5]. В таких камерах используется специальное многоэлементное ФПУ, каждый элемент которого может измерять расстояние до участка поверхности объекта. Фактически принцип работы такого ладара является дальнейшим развитием импульсного метода – измеряется время прохождения зондирующего импульса до цели и обратно.

Схема 3D-камеры с лазерной подсветкой представлена на рисунке 5. Получение первичных 3D-изображений требует значительно меньшей обрабатываемой мощности, чем требуется для обработки изображений, полученных с помощью систем стереотелевидения. К тому же используется только один приёмник излучения. Дальность действия такой системы будет ограничена разрешающей способностью ФПУ, а эффективность использования – несколькими десятками метров.

При условии увеличения поля зрения или применения механического сканирования, 3D-камеры наиболее перспективны для управления движением и навигацией мобильных роботов в заранее неизвестной обстановке [6].

Источники излучения

Для получения коротких мощных импульсов, используемых в лазерных системах, применяются твердотельные лазеры (ТТЛ), работающие в режиме модуляции добротности, и полупроводниковые инжекционные лазеры.

Используемые в лазерных системах источники излучения отличаются тем, что работают преимущественно в ближней ИК-области (0,81...1,5 мкм).

Это обусловлено резким снижением мощности отражённого сигнала с расстоянием до цели на фоне световых помех от естественных и искусственных источников в видимой области излучения. Для этой области оптического излучения можно использовать серийно выпускаемые компоненты аппаратуры.

Преимуществами полупроводниковых лазерных диодов (ЛД) является высокое значение КПД (до 50%), простота и надёжность в сочетании с малыми размерами и весом. Важным достоинством полупроводниковых ЛД является возможность осуществления модуляции их излучения путём изменения тока накачки в диапазоне частот до единиц гигагерц. Недостатки заключаются в ограниченной мощности импульса (сотни ватт) и низком качестве выходного излучения. Для получения необходимых характеристик излучения приходится использовать набор из нескольких ЛД и дополнительную оптику.

Твердотельные лазеры, широко используемые в лазерной дальнометрии и лазерной локации, позволяют

получить мощные импульсы излучения с частотами повторения, достаточными для проведения измерений. Наиболее распространены неодимовые ТТЛ, излучающие на длине волны 1,06 мкм.

Повышение энергетической эффективности ТТЛ является достаточно актуальным. Накачка ТТЛ может осуществляться посредством разрядной лампы, наполненной инертным газом, или с помощью ЛД. Свет от мощной некогерентной лампы с помощью соответствующей оптической системы передаётся активной среде (АС). Для накачки импульсных лазеров используется ксеноновая лампа.

Традиционно используемые газоразрядные лампы имеют спектр излучения в десятки раз шире линий спектра поглощения АС (см. рис. 6). Соответственно, доля мощности, поглощаемой уровнями накачки, достаточно низкая, и большая часть излучаемой мощности рассеивается в виде тепла. В результате КПД лазера обычно составляет несколько процентов. Кроме того, излучение газоразрядных ламп плохо

фокусируется, им требуются высокое напряжение питания и принудительное охлаждение.

Из-за большого энергопотребления мощные импульсы накачки могут вызывать перебои в системе бортового питания. Таким образом, мощность излучения лазера ограничена энергетикой питающих его устройств, что в свою очередь обуславливает введение ограничений на применение лазерной системы в дежурном и рабочих режимах. Это снижает эффективность системы управления и делает необходимым совершенствование компонентной базы.

В 1990-х годах стали получать большее распространение ТТЛ с т.н. полупроводниковой (диодной) накачкой (ППН). Главное их отличие заключается в том, что для оптической накачки используются лазерные диоды, которые излучают свет именно той длины волны, которая необходима для генерации лазерного излучения кристаллом ТТЛ. Согласование спектра излучения ЛД со спектром поглощения АС представлено на рисунке 7.

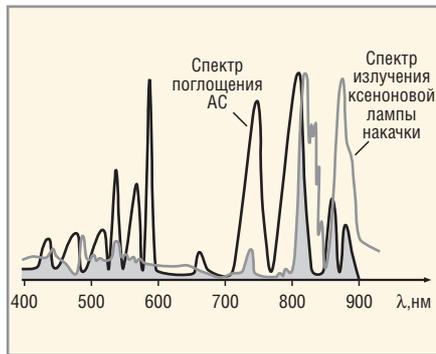


Рис. 6. Согласование спектров поглощения неодимовой АС и излучения ксеноновой лампы накачки

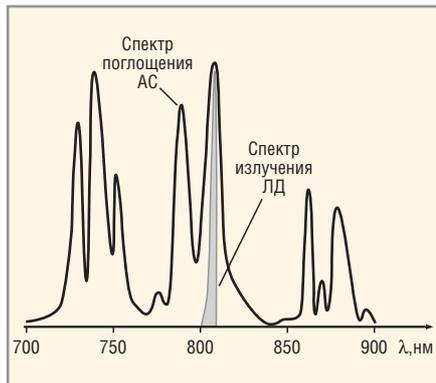


Рис. 7. Согласование спектров поглощения неодимовой АС и излучения ЛД

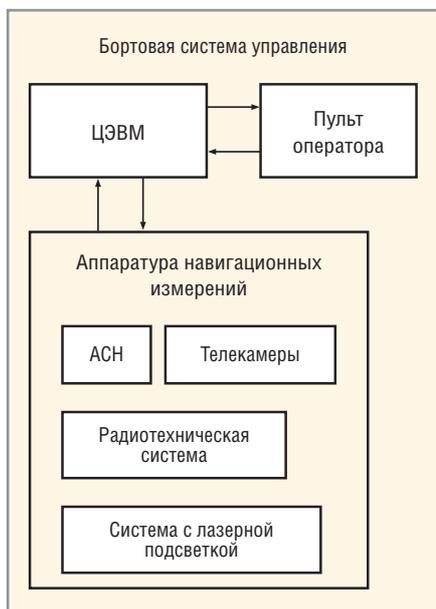


Рис. 8. Структурная схема системы управления транспортным средством или роботом

Лазерные диоды имеют более высокий КПД, их излучение малоинерционно, легко модулируется током накачки, имеет направленную структуру. Через управление накачкой можно точно и эффективно воздействовать на выходные параметры лазера, не внося изменений в его конструкцию. Время включения лазерного диода значительно меньше

характерной длительности накачки, поэтому форма импульса накачки близка к прямоугольной, что позволяет эффективно использовать подводимую энергию.

У газоразрядной лампы импульс накачки имеет форму колокола, задний фронт которого обычно следует после излучения импульса генерации, следовательно, его энергия не используется. Поэтому эффективность использования ламповой накачки составляет максимум 25...30%, а эффективность использования накачки посредством ЛД достигает 80...90% [7].

При использовании ЛД для накачки АС твердотельного лазера могут быть реализованы две схемы накачки: поперечная и продольная (торцевая).

При поперечной накачке линейки ЛД располагаются вдоль боковой поверхности АС и излучение накачки распространяется перпендикулярно направлению генерации. Преимущество такой схемы заключается в повышении мощности стимулированного излучения [8].

Основными достоинствами торцевой схемы ввода излучения накачки в АС являются высокая эффективность использования излучения ЛД и возможность обеспечения однододовой генерации путём пространственного согласования пучков накачки и излучения. Эффективность торцевой схемы накачки может достигать 34% [9].

Поскольку излучение лазерного диода имеет существенную расходимость в двух перпендикулярных плоскостях (в среднем $10^\circ \times 40^\circ$), необходимо использовать оптическую систему, обеспечивающую согласование светового потока накачки и поглощающего объёма АС. Из-за относительно высокой дифракционной расходимости излучения ЛД основные преимущества полупроводниковой накачки могут быть эффективно реализованы только в лазерах с размерами АС порядка 1...6 мм.

Благодаря современным технологиям, габариты и вес электронных блоков лазерных систем стали очень малы по сравнению с параметрами оптических и механических компонентов. Поэтому первостепенной задачей становится уменьшение массогабаритных характеристик последних. Это может быть осуществлено с использованием миниатюрных источников излучения на основе ТТЛ ППН. Их высо-

кая энергетическая эффективность позволяет создавать компактные автономные конструкции с батарейным питанием.

В то же время стоимость лампы накачки значительно меньше стоимости диодного модуля накачки. ТТЛ с ламповой накачкой, несмотря на низкий КПД, за счёт высокой мощности накачки может обеспечить большую мощность выходного излучения, что позволит лазерной системе конкурировать по дальности действия с радиотехническими системами. Выбор ламповой накачки определяется конкретными требованиями к лазерной системе.

Использование в качестве источников излучения наборов из нескольких полупроводниковых ЛД позволит достигнуть дальности действия системы до 10 км; использование ТТЛ ППН позволит увеличить расстояние до нескольких десятков километров.

В общем случае предпочтительным является использование на борту полупроводниковых ЛД или ТТЛ ППН. Возможен вариант исполнения аппаратуры, в состав которой входят различные типы излучателей, предназначенные для измерений в нескольких диапазонах дальности.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Обнаружение объекта узким полем излучения является сложной задачей для лазерной системы. Для поиска объекта приходится увеличивать расходимость луча, что закономерно приводит к снижению дальности обнаружения. Скорость обнаружения определяется размером поля поиска и величиной расходимости луча. В этой связи оптимальным решением представляется поиск объекта по данным предварительного целеуказания от других бортовых средств (радиотехнических, аппаратуры спутниковой навигации, телевизионных и тепловизионных камер).

Как в процессе функционирования системы автоматического управления, так и в работе оператора автоматизированной системы управления, многие проблемы возникают вследствие естественной низкой различимости целей на оптическом изображении при высоком уровне помех. Значительную роль в снижении характеристик обнаружения играют также шумовые

компоненты сигналов, образующиеся из-за особенностей применяемых датчиков и неидеальности каналов передачи данных. Решением этих проблем является совместное использование измерительных средств различного типа [10].

Общий принцип построения системы управления мобильным объектом заключается в обеспечении функционального и аппаратного резервирования для всех этапов движения. Функциональное резервирование осуществляется с помощью систем и приборов, основанных на различных физических принципах или приборах разных производителей.

Таким образом, в систему управления транспортным средством или роботом должна входить разнообразная аппаратура, обеспечивающая ориентацию и наведение на различных участках движения и дистанциях до объекта (см. рис. 8). Следует отметить, что, в зависимости от типа транспортного средства или робота, количество размещаемого на борту оборудования может быть ограничено. При его выборе следует исходить из принципа целесообразности.

Если в зоне работы лазерной системы могут находиться транспортные средства с экипажем или обслуживающий персонал, то следует обеспечить безопасность её излучения для органов зрения, что часто обеспечивается переходом на длину волны излучения 1,5 мкм, которое поглощается при прохождении через глазную среду и не фокусируется на сетчатку. Для получения такого излучения могут быть использованы ЛД на основе InGaAsP, ТТЛ ППП на эрбиевом стекле или неодимовые ТТЛ ППП с преобразованием длины волны излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малебный В.В.* Оптико-локационные системы. Машиностроение, 1981.
2. *Аспис Л.А., Васильев В.П., Волконский В.Б.* и др. Лазерная дальнометрия. Радио и связь, 1995.
3. *Карасик В.Е., Орлов В.М.* Лазерные системы видения. МГУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
4. *Вильнер В., Ларюшин А., Рудь Е.* Оценка возможностей светолокационного импульсного измерителя дальности с накоплением. Фотоника. 2007. № 6. С. 22–26.
5. *Сысоева С.* Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем

активной безопасности. Ч.7. Активные ИК-системы: лидары, системы ночного видения, 3D-камеры. Компоненты и технологии. 2007. № 4. С. 19–26.

6. *Pedersen L., Han C.S., Vitus M.P.* Dark Navigation: Sensing and Rover Navigation in Permanently Shadowed Lunar Craters. In the 9th Intern. Symp. on Artificial Intelligence. Robotics and Automation in Space. Los Angeles, CA, 2008. February.
7. *Шестаков А.* Активные элементы твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой. Фотоника. 2007. № 5. С. 30–32.
8. *Абазадзе А.Ю., Зверев Г.М., Колбацков Ю.М.* Эффективность поперечной накачки импульсного твердотельного лазера на Nd:YAG линейками лазерных диодов. Квантовая электроника. 2002. Т. 32. С. 205–209.
9. *Дрякин Е.В., Бугаев Ю.Н., Кулешов В.Н.* Моделирование твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой для систем траекторных измерений. Вестник МЭИ. 2001. Т. 4. С. 57–65.
10. *Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В.* Перспективы интеллектуализации систем управления ЛА за счёт применения технологий машинного зрения. Труды МФТИ. 2009. Т. 1. № 4. С. 164–181.



Новости мира News of the World Новости мира

WirelessHD 1.1: до 28 Гбит/с без проводов

Консорциум WirelessHD, занимающийся продвижением на рынок одноимённой технологии беспроводной связи, заявил о доступности новой версии спецификации WirelessHD 1.1. Напомним, её анонс состоялся ещё в январе на выставке Consumer Electronics Show 2010 в Лас-Вегасе.

Организация WirelessHD называет своё детище технологией связи следующего поколения. Среди особенностей стандарта версии 1.1 поддержка 3DTV, HDCP 2.0, а также возможность передачи данных по беспроводному каналу на скоростях свыше 10 Гбит/с. Как отмечается, устройства, поддерживающие WirelessHD 1.1, будут обратно совместимыми с предыдущей версией спецификации WirelessHD 1.0.

Среди ключевых отличий новой версии стоит выделить:

- оптимизированную архитектуру, которая обеспечивает передачу аудио/видеопотоков и файлов на высоких скоростях при минимальном напряжении питания;

- скорость передачи данных 10–28 Гбит/с (в версии 1.0 – до 4 Гбит/с), что отвечает требованиям будущего по передаче видео с более высоким качеством и больших объёмов данных;
- 3D over WirelessHD – определение форматов 3D и разрешений видео для WirelessHD-совместимых устройств;
- поддержку так называемого разрешения 4K – в четыре раза более высокого по сравнению с Full HD 1080p;
- поддержку WPAN Data;
- поддержку портативных устройств – WirelessHD теперь обеспечивает возможность работы с потоками видео без потерь для маломощных устройств, включая карманные проигрыватели, нетбуки и смартфоны;
- в дополнение к механизму шифрования DTCP добавлена поддержка HDCP 2.0 over WirelessHD.

WirelessHD на сегодня остаётся единственной технологией беспроводной связи, обеспечивающей передачу несжатых потоков высококачественного контента аудио/видео в 60-Гц диапазоне. Консорциум WirelessHD, основанный в 2006 г., уже включает более 45 членов, включая

Broadcom, Intel, LG Electronics, Panasonic, Royal Philips Electronics, NEC, Samsung Electronics, Sony, Toshiba, Hitachi, Olympus, Sharp Electronics, VIZIO, TDK, Yamaha.

<http://www.wirelesshd.org/>

Hitachi Maxell: новый мировой рекорд по плотности записи на магнитную ленту

Японские исследователи из Hitachi Maxell в сотрудничестве с учёными из Токийского технологического института (Tokyo Institute of Technology) заявили о достижении нового рекорда плотности записи на магнитную поверхность. Благодаря использованию сверхтонкой ленты, специально разработанной в институте, учёным удалось достичь плотности записи 45 Гб на квадратный дюйм. Исследователи заявляют, что картриджи, созданные с использованием новой ленты, смогут вместить до 50 Тб данных. Сроки внедрения технологии в промышленное производство на данный момент неизвестны.

<http://www.maxell.co.jp/>