

Анализ сенсоров систем технического зрения для нужд промышленного железнодорожного транспорта



П.Е. Машченко,
к.т.н., заместитель
генерального директора
ООО «ЛокоТех-Сигнал» (ЛТС)



К.В. Шутилов,
руководитель отдела
компьютерного зрения
ООО «ЛокоТех-Сигнал»

Сегодня после нескольких лет безуспешных попыток масштабирования беспилотных технологий в автотранспорте [1] инвесторы начинают обращать внимание на другие отрасли, где также существует потенциал внедрения автопилота, но имеется меньший срок реализации проектов и более короткие периоды окупаемости. Таковым является железнодорожный транспорт. Однако для эффективной и безопасной эксплуатации автоматизированного локомотива возможности его технического оснащения должны превосходить возможности машинистов. В первую очередь локомотивы должны видеть в темноте, в различных погодных условиях, определять препятствия и путь предполагаемого движения. Для решения указанной задачи и в рамках разработки собственного продукта технического зрения ЛТС (входит в группу «Трансмашхолдинг») провела системный анализ доступных на рынке сенсоров с целью определения наиболее оптимального их набора для автоматизации работы локомотивов.

Пилотный проект

Один из самых сложных проектов ЛТС был реализован в 2020 году на Череповецком металлургическом комбинате (далее – ЧерМК) (входит в ПАО «Северсталь»): маневровый тепловоз ТГМ6А был оборудован

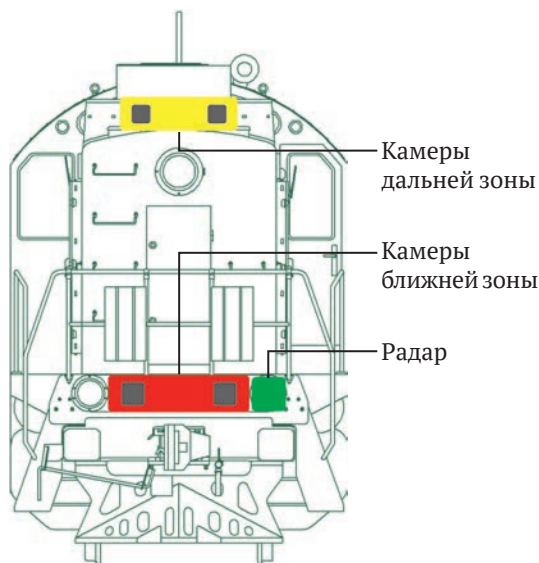


Рис. 1. Система расположения технического зрения Ctrl@Vision 100

системой определения препятствий и предотвращения столкновений Ctrl@Vision 100 (рис. 1). Она является частью общего одноименного семейства систем, обеспечивающих разные уровни автоматизации – от выполнения функций контроля до полностью автоматического управления движением. Бизнес-модель предполагает, что переход между уровнями автоматизации не требует замены оборудования и, соответственно, дополнительных расходов, обеспечивая при этом сохранность инвестиций. На данный момент идет подконтрольная эксплуатация системы.

ЧерМК располагает большим парком маневровых локомотивов, используемых для доставки сырья к цехам и отгрузки продукции на железную дорогу. На предприятии большое количество кривых малого радиуса и объектов инфраструктуры (в том числе металлоконструкций), поэтому есть особые требования:

- к идентификации стрелок, светофоров, железнодорожных переездов, пикетных столбиков, тупиков;

- к освещению;
- к ограждению путей при формировании составов, к технологии очистки от снега, к содержанию объектов инфраструктуры в целом.

Пропускная способность на предприятии используется на максимальном уровне, что обуславливает потребность в беспилотной маневровой работе, повышении ее безопасности и надежности. Перед ЛТС поставили

задачу обеспечить: обнаружение препятствий по ходу локомотива и предотвращение столкновений (оповещение машиниста или автоматическое торможение), классификацию препятствий, отслеживание пути движения локомотива, определение точной траектории его движения, контроль пробега и точного местонахождения в реальном времени. Для ее решения разработчиками были использованы различные виды сенсоров.

Основные параметры эффективности технического зрения

Предварительные исследования показали, что эффективность систем технического зрения определяют следующие характеристики:

1. **Дальность детектирования.** На промышленных предприятиях, как правило, скорости движения находятся на невысоком уровне, в связи с чем системе технического зрения достаточно видеть на расстоянии от 100 м, чтобы осуществить торможение в случае обнаружения препятствия.
2. **Устойчивость к погодным условиям.** На железнодорожном транспорте сенсоры должны видеть во время снегопадов, ливневых дождей и туманов не хуже машиниста.
3. **Углы обзора.** Малые радиусы кривых повышают требования по углу обзора, одна-

ко, в отличие от беспилотного движения на автомобилях, не требуют обзора 360°.

4. **Стоимость решения.**
5. **Время реакции.** Система не должна реагировать медленнее машиниста (примерно 0,5 сек.) [2].
6. **Доступность на российском рынке.** Международная эпидемиологическая обстановка и санкционный режим требуют учитывать риски невозможности приобретения необходимого оборудования.
7. **Сложность в обслуживании.** Сервис системы технического зрения должен быть синхронизирован с плановыми ТО локомотивов.
8. **Насыщенность данных.** Объем информации, получаемый от сенсора, способствует его дальнейшей точной настройке.

Применяемые сенсоры: камеры

Камера – это основной сенсор, который является единственным устройством для распознавания знаков или определения показания светофора и способным различать цвета. В проекте с ПАО «Северсталь» показания светофоров не имели значения, поэтому в подобных случаях целесообразно применять монохромные камеры для более высокой четкости съемки. Изображения с камер поддаются глубокой проработке и интерпретации полученных данных с помощью нейросетей, которые определяют конкретные объекты (человек, автомобиль, подвижной состав, стрелки, рельсы и т. д.). Камеры дешевле других сенсоров – лидаров и радаров – будут рассмотрены ниже. В си-

стеме Ctrl@Vision 100 применены 4 камеры: одна – для ближней зоны (20 м), одна – длиннофокусная для детектирования объектов от 100 м, а также еще две в качестве стереопары для определения расстояния до объектов.

Основным недостатком камер является зависимость от погодных условий (рост ошибок при плохом качестве изображения, недостаточной освещенности, бликах и засветах), в связи с чем возникает потребность в других источниках данных. Также камеры являются достаточно хрупким изделием, не способны работать при низких и высоких температурах без дополнительной защиты и плохо защищены от внешних физических воздействий, однако такой недостаток нивелируется



Рис. 2. Пример защитного блока для камер в системе технического зрения

установкой их в специальный защитный блок с контролем температур (рис. 2).

Критическим для эффективности работы технического зрения является правильный подбор объективов. Согласно европейскому стандарту для систем безопасности DIN EN 50132-7 [3], уверенное детектирование человека требует разрешения по горизонту на уровне 25 пикс. на 1 м. Выработка требования для детектирования автомобилей и подвижного состава потребовала дополнительного анализа, так как в доступной нормативной базе таковые отсутствуют.

Для решения этой задачи был проведен расчет, исходя из предположения, что между камерой и препятствием будет находиться прямой участок пути. Не учитывались параметры плотности, температуры и влажности воздуха, эффектов линз объектива, а также кривизны земли. Применены следующие допущения по параметрам объектов:

- **Человек:** средний рост мужчины в России – 1 760 мм [4];
- **Легковой автомобиль:** размер самой распространенной модели в России 2020 года ВАЗ-2107 [5] в самой большой проекции – 4 145 мм [6];
- **Грузовой автомобиль:** размер самой распространенной модели 2018 года ГАЗ-53 [7] в самой большой проекции – 6 330 мм [8];
- **Светофор:** размер двухцветового линзового светофора в самой большой проекции – 1 165 мм;
- **Предельный столбик:** видимая часть предельного столбика в самой большой проекции – 500 мм;
- **Красный щит:** размеры знака GD-04 «Переносной сигнал остановки» в самой большой проекции – 600 мм;
- **Тупиковая призма:** длина балки тупиковой призмы – 2 750 мм;
- **Указатель путевого заграждения:** является квадратным знаком со стороной 360 мм.

На основе указанных параметров проведены расчеты для камеры с разрешением 5 мегапикселей и разными фокусными возможностями объективов. Они показали, что 5 мегапикселей достаточно для детектирования различных объектов с разным набором объективов на довольно большие расстояния. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Табл. 1. Максимальная дальность обнаружения различных групп объектов (в метрах) при различных фокусных расстояниях объектива

Фокусное расстояние объектива, мм	Человек	Автомобиль	Грузовик	Светофор	Предельный столбик	Красный щит	Тупиковая призма	Указатель путевого заграждения
2,8	69,7	164,1	250,6	46,3	19,8	23,8	108,9	14,3
25	504	1 200,8	1 833,8	338,9	144,9	173,8	796,7	104,3
50	1 008,3	2 402	3 668,2	678	289,8	347,7	1 593,6	208,6
75	1 512	3 602	5 500,7	1 016,7	434,5	521,4	2 389,8	312,8

Применяемые сенсоры: лидары

Лидары находятся на втором месте по распространенности после камер. Данное устройство освещает объект (поверхность) коротким световым импульсом и измеряет время, за которое сигнал возвращается к

источнику. В результате формируется облако точек, по которым строится трехмерное изображение пространства (вплоть до 360°) вокруг устройства в реальном времени. Лидар возможно использовать в любом освещении.

щении. Востребованность их применения в системах технического зрения на железнодорожном транспорте обусловлена хорошей отражающей способностью инфраструктуры и подвижного состава, позволяющей детектировать препятствия на удаленности от 150 м (рис. 3).

Основной недостаток лидара – его стоимость: у некоторых моделей она может достигать до нескольких миллионов рублей. Несмотря на тенденцию по ее снижению при сохранении технических характеристик, цена стала одним из основных факторов того, что в проекте для ПАО «Северсталь» вместо лидара был использован радар. Применение лидаров отложено на следующие версии системы Ctrl@Vision 100. Также стоит отметить, что возможно и совместное использование лидаров и радаров. Это целесообразно, так как качество работы лидаров сильно за-

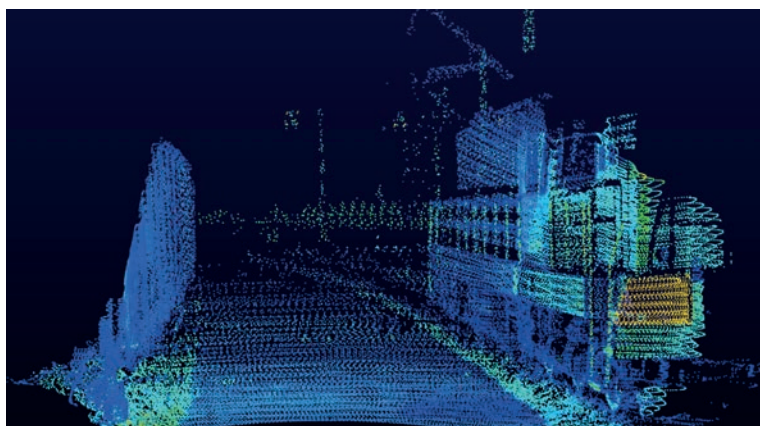


Рис. 3. Пример построения изображения лидаром на железной дороге

висит от погодных условий: они малоэффективны в условиях сильного дождя, тумана и снега из-за рефракции (однако данные остаются пригодны для анализа), а также не работают с неоднородными поверхностями, например с водой.

Применяемые сенсоры: радары

Радар, в отличие от лидара, излучает и регистрирует радиосигнал. Он обеспечивает превосходную проникающую способность при любых погодных условиях и любом освещении. Кроме того, радиолокационные системы благодаря эффекту Доплера позволяют рассчитывать и регистрировать скорость движущегося объекта. Данные, собранные с помощью радиолокационных систем, можно использовать для получения трехмерных изображений местности на основе различных углов возврата радиосигнала.

Основной недостаток радара – низкое разрешение результатов сканирования. Соответственно, можно получить либо данные об объектах на большом расстоянии, но в маленькой области, либо на маленьком расстоянии, но в большей области. Радары с возможностью детектирования на большие

расстояния существуют, но их стоимость в разы выше. Также радары не имеют способности определять размер и форму предметов (рис. 4). Совместное применение радаров и лидаров компенсирует недостатки двух устройств.

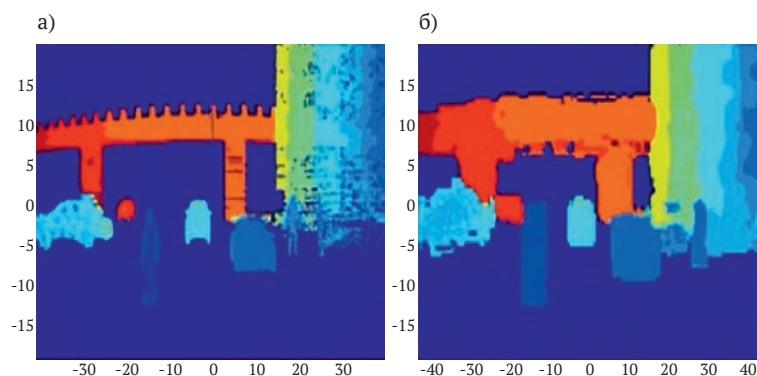


Рис. 4. Пример изображений: а) с лидара; б) с радара

Применяемые сенсоры: УЗ-датчик

Ультразвуковой датчик – сонар (рис. 5) при приближении объекта к препятствию издает звуковой сигнал. Ассортимент УЗ-датчиков на рынке достаточно широк и их цена является более низкой по сравнению с

другими сенсорами. Отличаются они дальностью детектирования, формами и возможностью работы в различных внешних условиях. Однако угол обзора УЗ-датчиков сильно ограничен, в связи с чем их зачастую

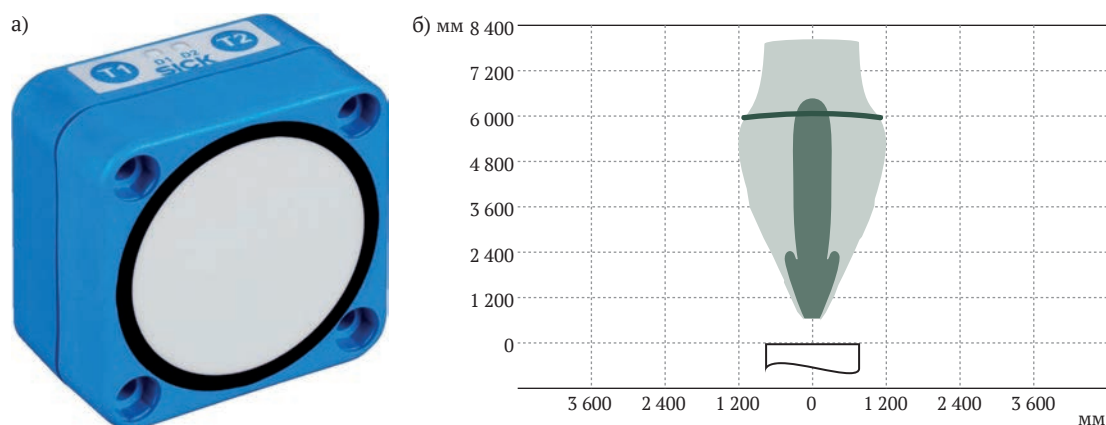


Рис. 5. УЗ-датчик: а) вид; б) область детектирования

применяют для отслеживания слепой зоны локомотива, например при сцепке вагонов. В проекте для ПАО «Северсталь» эта функция была реализована за счет радара. Основ-

ные недостатки УЗ-датчика – ограниченное расстояние детектирования и отсутствие какой-либо информации об обнаруженном объекте.

Применяемые сенсоры: тепловизоры

Общий недостаток коммерческих лидаров и радаров – ограничение по дальности видимости (не превышает 300 м). При потребности видеть от 500 м по прямой используются или камеры с длиннофокусными объективами (но порой их недостаточно), или тепловизоры. Проект с ПАО «Северсталь» не требовал работы на таких расстояниях, однако технология может быть востребована на магистральных локомотивах.

Принцип работы тепловизора основан на регистрации и анализе температуры поверхности объектов с помощью инфракрасного излучения. Неравномерность нагрева одной

и той же поверхности позволяет формировать картину распределения температуры на ней, ассоциируя цвет на дисплее с температурой. Тепловизоры могут эффективно работать в значительно более сложных условиях по сравнению с обычными камерами видеонаблюдения. Матрица устойчива к самым сложным погодным условиям и способна работать в полной темноте. В зависимости от типа объектов дальность обнаружения может составлять до 5 000 м. Ключевой недостаток тепловизионных камер – высокая цена, которая может быть в разы выше, чем у камер видимого света.

Сравнение сенсоров

Предварительная проработка и дальнейшая реализация проекта для ПАО «Северсталь» показали, что для беспилотных систем на железнодорожном транспорте не существует идеального и универсального сенсора, удовлетворяющего всем необходимым эксплуатационным условиям у разных заказчиков.

С учетом оценок качества сенсоров в других источниках [9-11] командой ЛТС был проведен собственный анализ их эффективности по 10-балльной шкале. Не-

обходимость альтернативного анализа существует из-за того, что большинство имеющихся оценок ориентированы на автомобильный транспорт и не учитывают специфических особенностей железнодорожного транспорта (высокое количество объектов из металлов, более длинный тормозной путь и т. д.). Баллы выставлялись на основе технических, ценовых и конструктивных особенностей устройств. Карта оценок по ключевым параметрам представлена на рисунке 6.

Анализ лепестковой диаграммы показывает, что идеального датчика не существует. Необходимо проводить объединение сенсоров с помощью специальных алгоритмов, которые позволяют устранить недостатки определенного типа датчиков и объединить их преимущества. Наиболее сбалансированным сенсором является лидар. Учитывая, что в развитие лидара ведущие производители вкладывают большие средства [12], можно назвать его еще и самым перспективным датчиком для решения указанных выше в статье задач.

Одной из целей внедрения автономного движения на железнодорожном транспорте является сохранение жизни и здоровья людей. Применение новых технологий уменьшит вероятность возникновения нештатных происшествий. Для достижения этого система должна уметь работать лучше, чем машинист. Современные технологии позволяют этого добиться.



Рис. 6. Сравнение эффективности сенсоров технического зрения по ключевым параметрам на основе 10-балльной оценки специалистов ЛТС

Список использованной литературы

1. Where Are the Self-Driving Cars? The future was arriving in 2020! What happened? – [Электронный ресурс] URL: <https://medium.com/predict/where-are-the-self-driving-cars-b5124e3da293> (Дата обращения: 15.01.2021).
2. Козубенко В.Г. Безопасное управление поездом: вопросы и ответы: учеб пособие. – М.: Учеб.-методический центр по образованию на ж.-д. трансп., 2008.
3. DINEN 50132-7 VDE 0830-7-7:2013-04-2013 [Электронный ресурс] URL: <https://www.vde-verlag.de/standards/0830082/din-en-50132-7-vde-0830-7-7-2013-04.html> (Дата обращения: 15.01.2021).
4. Average sizes of men and women [Электронный ресурс] URL: <https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php> (Дата обращения: 15.01.2021).
5. Структура и прогноз парка легковых автомобилей в России [Электронный ресурс] URL: <https://www.autostat.ru/research/product/311/> (Дата обращения: 15.01.2021).
6. Габариты автомобиля ВАЗ 2107 и другие характеристики [Электронный ресурс] URL: <https://7vaz.ru/ustrojstvo/gabariti.html> (Дата обращения: 15.01.2021).
7. Топ-10 самых распространенных грузовиков в России [Электронный ресурс] URL: <https://www.autostat.ru/news/35832/> (Дата обращения: 15.01.2021).
8. Автомобиль ГАЗ 53 [Электронный ресурс] URL: <http://www.autosoft.ru/directory/info/gaz/53/model.html> (Дата обращения: 15.01.2021).
9. The Future of Sensors for Self-Driving Cars: All Roads, All Conditions [Электронный ресурс] URL: <https://www.extremetech.com/computing/305691-the-future-of-sensors-for-self-driving-cars-all-roads-all-conditions> (Дата обращения: 15.01.2021).
10. Rosique, F. et al. A systematic review of perception system and simulators for autonomous vehicles research //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 3. – С. 648.
11. How 10 leading companies are trying to make powerful, low-cost lidar [Электронный ресурс] URL: <https://arstechnica.com/cars/2019/02/the-ars-technica-guide-to-the-lidar-industry/> (Дата обращения: 15.01.2021).
12. Barnard, M. Tesla & Google disagree about LIDAR—which is right //Sustainable Enterprises Media, Inc. – 2016. (S)