

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-25-43>



УДК 656.072

Ультразвуковой программно-аппаратный комплекс учета пассажиров общественного транспорта

А.С. Зуев[@],
Д.В. Файчук

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: zuev_a@mirea.ru

В статье приведено описание разработанного авторами бортового бесконтактного программно-аппаратного комплекса учета пассажиров общественного транспорта, позволяющего в режиме реального времени: фиксировать показания ультразвукового дальномера о движении объектов на вход и выход через дверной проем; обрабатывать полученные наборы значений и определять численность вошедших и вышедших людей на остановках; отправлять данные через штатные модули связи транспортного средства с целью формирования информационного обеспечения специализированных сервисов мониторинга пассажиропотоков и движения общественного транспорта, а также решения соответствующих задач предиктивной аналитики. Выполнен обзор существующих аналогов, основанных на применении лазерных датчиков, тепловизоров, технологий компьютерного зрения и элементов регистрации воздействий на пол, выделены как их преимущества, так и недостатки, ограничивающие массовое применение. Для предложенного программно-аппаратного комплекса приведены: результаты сравнения с аналогами и обоснование возможностей внедрения на пассажирском транспорте; описание аппаратной составляющей — состава основных использованных комплектующих (контроллер STM32, ультразвуковой дальномер, инфракрасный дальномер); методы обработки показаний ультразвукового дальномера с целью определения численности вошедших и вышедших пассажиров, в том числе в условиях их скопления по обе стороны дверного проема и чередования движений на вход и выход группами и по одиночке; варианты исполнения модулей по форм-фактору корпуса, а также по составам и количеству используемых комплектующих; варианты комплектования модулями и описания схем их установки в соответствии с особенностями задач его применения для контроля дверных проемов различной, в том числе произвольной ширины.

Ключевые слова: учет пассажиров, пассажиропоток, общественный транспорт, транспортная система, ультразвуковой дальномер.

Для цитирования: Зуев А.С., Файчук Д.В. Ультразвуковой программно-аппаратный комплекс учета пассажиров общественного транспорта. *Российский технологический журнал*. 2019;7(6):25-43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-25-43>

Ultrasonic software-hardware complex for tracking public transport passengers

Andrey S. Zuev[@],
Dmitriy V. Faichuk

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: chesalin_an@mail.ru

The article provides the description of an on-board no-touch software-hardware complex for tracking public transport passengers. The complex was designed by the authors. It allows carrying out the following actions in real time: writing down the readings of an ultrasound range finder on objects entering and exiting the door frame; processing the accumulated sets of data and determining the number of people that entered and exited the vehicle during stops; sending out the data through standard connection modules of the vehicle in order to provide specialized monitoring services with information on passenger flow, as well as solving corresponding tasks of predictive analytics. The article overviews existing analogs that are based on using laser detectors, thermal scopes, computer vision technology and floor impact detectors. Their advantages as well as weaknesses that limit their mass use are highlighted. The article also provides the following for the offered software-hardware complex: comparison results, grounds for implementing it on public transport; a description of the hardware part – the composition of the main accessories used (an STM32 controller, an ultrasound diastimeter, an infrared diastimeter); methods for processing the data given by the ultrasound range finder in order to determine the number of passengers that entered and exited the vehicle, including situations when there are many of them on both sides of the door frame, including alternating motions to enter and exit in groups as well as one by one; options of module performance according to the case's form factor, as well as according to compositions and the number of accessories used; options of compiling modules and describing their installation schemes according to the specifics of the tasks of use to control door frames of various width, including random width.

Keywords: passenger tracking, passenger flow, public transport, transportation system, ultrasound range finder.

For citation: Zuev A.S., Faichuk D.V. Ultrasonic software-hardware complex for tracking public transport passengers. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):25-43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-25-43>

Введение

Объективной и исторически сложившейся закономерностью становления и развития любого государства является формирование в его составе урбанизированных территорий, в которых сконцентрированы производственные, транспортные и инженерные сооружения, обеспечивающие рациональную географическую локализации материальных, трудовых, энергетических и финансовых ресурсов.

Усиление проявлений данной закономерности обусловливается научно-техническим прогрессом, историческим процессом смены технологических укладов [1] и интенсифицируется в процессе четвертой технологической революции [2]. Например, для государств с индустриальной и постиндустриальной экономикой характерно формирование городских агломераций как моноцентрического, так и полицентрического типов [3].

Одной из ключевых задач развития любых городских агломераций является совершенствование их транспортных систем [4] и, в частности, системы общественного транспорта [5], предоставляющей услуги физическим лицам в условиях усиливающейся маятниковой миграции населения и, как следствие, реализующей пассажиропотоки с возрастающей мощностью.

Исходными данными, необходимыми и достаточными для анализа параметров пассажиропотоков всех видов общественного транспорта и, как следствие, для выработки решений по развитию данной системы, являются значения численности пассажиров, вошедших в каждое отдельное транспортное средство и покинувших его на остановках и в транспортно-пересадочных узлах. Агрегирование данных значений по различным комбинациям таких параметров, как время суток, день недели и месяц, конкретная остановка, часть маршрута или маршрут транспорта, состав маршрутов с пересечением в конкретном транспортно-пересадочном узле и т. п., позволяет обеспечить полную осведомленность лиц, принимающих решения, о параметрах пассажиропотоков системы общественного транспорта.

В статье приводится обзор существующих систем учета пассажиров, основанных на применении оборудования с различными физическими принципами функционирования (лазерные датчики, тепловизоры, компьютерное зрение, регистрация изменений веса), выделяются их преимущества и исследуются недостатки, ограничивающие возможности массового применения. Авторами предлагается программно-аппаратный комплекс, встраиваемый в состав штатной бортовой аппаратуры транспортного средства, позволяющий в режиме реального времени решать задачу учета пассажиров с применением ультразвукового дальномера и в результате – формировать информационное обеспечение для задач анализа и предиктивной аналитики параметров пассажиропотоков.

Обзор существующих систем анализа наличия и перемещения людей

Любая бесконтактная система учета пассажиров основывается на применении оборудования с конкретными физическими принципами функционирования для анализа наличия и перемещения людей в некотором контролируемом пространстве. В настоящее время могут быть выделены классы систем, основанных на лазерных сенсорах, тепловизорах, компьютерном зрении и регистрации воздействий на пол (изменений веса) [6].

Системы с применением лазерных сенсоров. Применение лазерных сенсоров является одним из самых распространенных подходов к решению задачи мониторинга перемещения людей. Соответствующие системы могут быть классифицированы по следующим признакам:

1. По способу определения наличия объекта: на основе измерения дистанции; на основе прерывания луча.
2. По месту размещения (рис. 1): горизонтальные и вертикальные (сенсоры монтируются соответственно на стенах и на потолке).
3. По способности определять направление перемещения объекта: однонаправленные – на основании показаний одного датчика фиксируется факт прохода объекта через контролируемую зону; двунаправленные – на основании показаний нескольких датчиков анализируется направление (траектория) перемещения объекта.

Наиболее распространенными являются горизонтальные системы с использованием двух сенсоров дистанции, расположенных на некотором удалении друг от друга (и иногда на противоположных стенах): проходящий через контролируемую зону объект

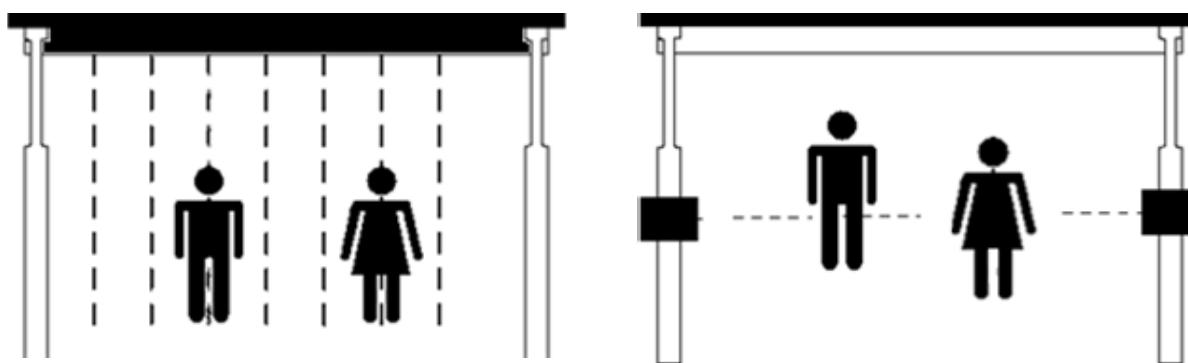


Рис. 1. Вертикальная и горизонтальная схемы размещения датчиков.

будет зарегистрирован обоими датчиками с некоторым лагом времени, на основании последовательности их срабатывания определяется направление перемещения, а значения дистанции до объекта от каждого из датчиков позволяют регистрировать факты одновременного прохода двух объектов. Менее распространены вертикальные системы с матрицей (набором полос) датчиков дистанции, показания которых формируют карту высот контролируемого пространства и позволяют выделять перемещающиеся в нем объекты.

Достоинствами систем с лазерными сенсорами являются низкая стоимость датчиков с прерыванием луча, простота использования и монтажа, малое энергопотребление и возможность автономного питания, высокая точность регистрации одного и двух объектов. Среди недостатков могут быть выделены: высокая стоимость датчиков с определением дистанции, отсутствие возможности мониторинга потока объектов малым количеством датчиков, потребность в обеспечении расстояния между горизонтально установленными датчиками не менее 0.5 м (исключает возможность установки в общественном транспорте). Объективные ограничения применения систем с лазерными сенсорами дистанции при распознавании входа и выхода пассажиров в общественном транспорте обусловлены особенностями оптического принципа локации объектов [7]:

- наличие интенсивного солнечного света;
- углы падения луча сильно отличаются от 90° ;
- наличие шершавых рассеивающих поверхностей;
- наличие поглощающих темных (черных) поверхностей;
- запотевание, загрязнение фокусирующей линзы.

В рассматриваемом классе систем целесообразно отдельно выделить системы с применением технологии LIDAR (лидар, *Light Identification Detection and Ranging* – обнаружение, идентификация и определение дальности с помощью света), например, MS Kinect [8]. Оптический локатор испускает множество неколлинеарных световых пучков, фиксирует время их распространения, позволяет получать облака точек в пространстве и на их основе анализировать окружающую обстановку. На рис. 2 представлен пример изображения пространства, получаемого с лидара.

Основным преимуществом данного подхода является в разы бóльшая разрешающая способность по сравнению с одиночными датчиками. Но сопутствующие недостатки – крайне высокая стоимость, сложность эксплуатации и обработки получаемых данных, невозможность использования в ограниченном пространстве – ограничивают сферы возможного применения, в том числе исключают возможность установки на общественном транспорте.

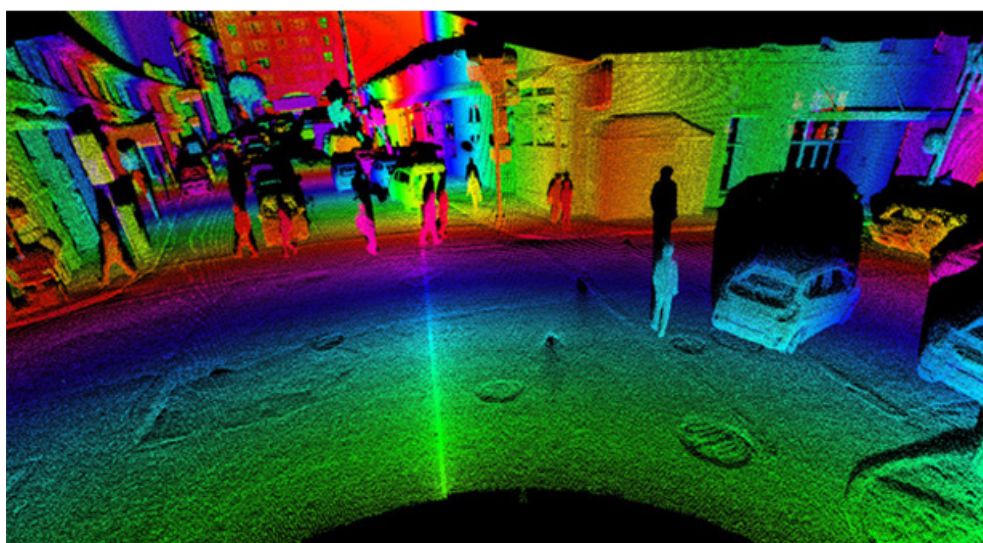


Рис. 2. Пример изображения, получаемого с лидара.

Системы с применением оборудования теплоизмерения. Применение тепловизоров является альтернативным подходом к построению карты высот контролируемого пространства: формируется тепловая карта, четкость которой зависит от разрешения матрицы устройства (рис. 3). Обзор задач применения оборудования тепловизионного контроля и идентификации наличия и перемещения людей изложен, в частности, в [9].

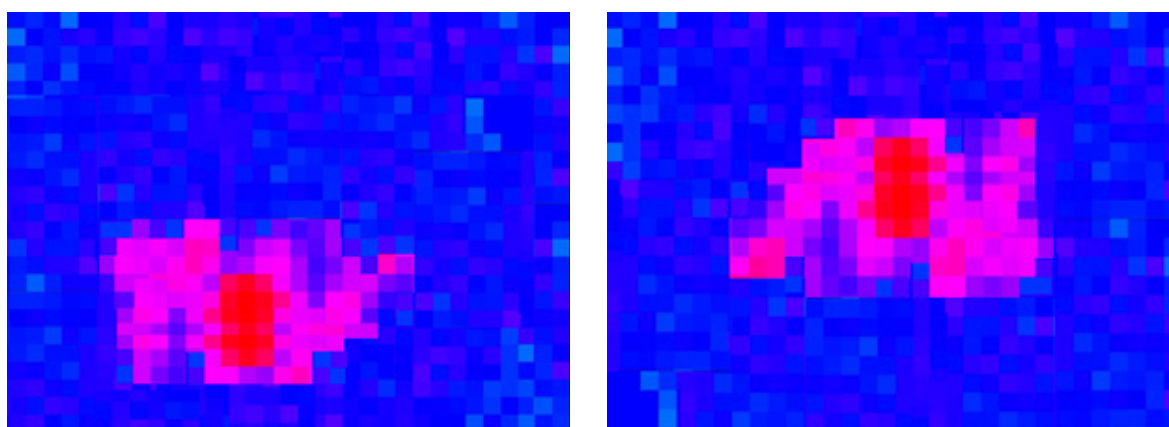


Рис. 3. Пример тепловой карты проходящего человека, разрешение 32×24.

Достоинствами систем с тепловизорами являются: высокая точность при высоком разрешении матрицы; возможность отличать маленьких детей от багажа и ручную кладь от частей тела человека; отсутствие влияния погодных условий; полная невосприимчивость к структуре, отражающей (излучающей) поверхности. Среди недостатков могут быть выделены: крайне высокая стоимость тепловизора даже при слабой разрешающей способности матрицы; слабая разрешающая способность даже по сравнению с самыми простыми камерами видеонаблюдения; засветы от поверхностей с температурой выше 36 °С (характерны для общественного транспорта с круговым остеклением в теплое время года); необходимость установки на значительной высоте для охвата всей контролируемой зоны (исключает возможность установки в общественном транспорте).

Системы с регистрацией изменений веса. В общем виде данные системы представляют собой набор напольных тензопластин, осуществляющих измерение оказываемого

на них давления и передающих данные в модуль контроля (рис. 4). По последовательности зафиксированных воздействий на пластины определяется маршрут перемещения человека в контролируемом пространстве. Достоинствами данных систем являются низкая стоимость, простота в использовании, поддержке и обработке поступающих данных. Среди недостатков могут быть выделены: наличие механических элементов, имеющих ограниченное число рабочих циклов; чувствительность к вибрации (оказывающей постоянное воздействие в условиях движения); невозможность однозначной идентификации людей и багажа; нецелесообразность установки в низкопольном подвижном составе вследствие отсутствия ступеней, позволяющих определить направление прохода пассажиров (исключает целесообразность применения в современном общественном транспорте).

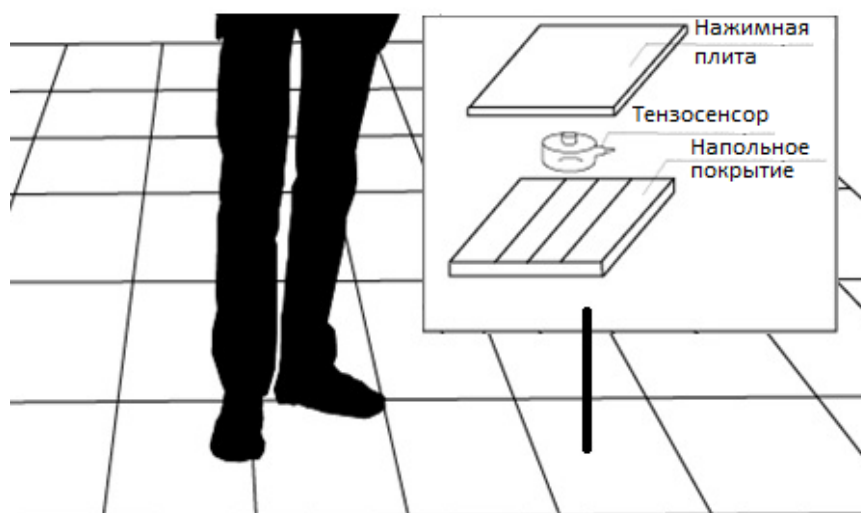


Рис. 4. Системы с регистрацией изменений веса.

Системы с применением компьютерного зрения. Данные системы основаны на применении камер видеонаблюдения и специализированных алгоритмов выделения объектов, например, лиц, из видеопотока [10], а их точность и быстродействие напрямую зависят от возможностей программного и технических характеристик аппаратного обеспечения. На рис. 5 приведен пример отслеживания головы пассажира в видеопотоке методами компьютерного зрения. Соответствующие системы могут быть классифицированы по следующим признакам:

1. По способу расположения модуля видеофиксации: зенитно – перпендикулярно полу; наклонно – под некоторым углом к потолку; горизонтально – параллельно полу.
2. По количеству модулей видеофиксации: одиночные и многомодульные (в состав модуля может входить одна или несколько камер).
3. По составу модулей видеофиксации: одиночные камеры или стереокамеры – комплексы из двух или более объективов, создающих отдельные кадры в один и тот же момент времени.

При использовании одиночной камеры применяются алгоритмы, основанные на нахождении разницы в последовательности кадров и выделении на ее основе движущихся объектов. Стереокамера позволяет определять расстояния до наблюдаемых объектов [11]: положение далеких объектов на изображениях не будет отличаться, тогда как положение близких будет иметь расхождение, величина которого напрямую зависит от дистанции между объективами и фокусного расстояния камер. Используя расстояние до объектов как новую координату – глубину, можно строить карту глубин (высот) и использовать эту информацию, чтобы отличать людей от прочих движущихся объектов, таких как тени или багаж.



Рис. 5. Пример распознавания головы пассажира системой компьютерного зрения.

Достоинствами систем с компьютерным зрением являются: высокая точность выделения целевых объектов в видеопотоке; возможность полного совмещения с системами видеонаблюдения [12]. Среди недостатков могут быть выделены: низкая точность в условиях ограниченного пространства; сложность монтажа и технического обслуживания; высокая стоимость и большой объем обрабатываемой информации; необходимость установки отдельных камер для контроля посадки и высадки через каждый дверной проем; в случае использования для учета пассажиров штатной системы видеофиксации в транспортном средстве – необходимость полной проверки численности пассажиров во время движения между каждой парой остановок; чувствительность к динамическим изменениям освещения и окружающей обстановки в условиях общественного транспорта с круговым остеклением.

Выводы об ограничениях применения существующих систем. Рассмотренные выше классы систем учета пассажиров имеют следующие ключевые недостатки:

1. Системы с применением лазерных сенсоров – высокая стоимость датчиков с определением дистанции, ограниченные возможности установки в условиях малого пространства.
2. Системы с применением оборудования теплоизмерения – высокая стоимость, зависимость от параметров окружающей обстановки, отсутствие возможностей мониторинга ограниченного пространства.
3. Системы с применением компьютерного зрения – чувствительность к освещению, большой объем обрабатываемой информации, высокая стоимость.
4. Системы с регистрацией изменений веса – наличие механических элементов, чувствительность к вибрации, нецелесообразность установки в низкопольном подвижном составе.

Структура и примеры функционирования разработанного комплекса

Перечисленные выше недостатки существующих классов систем учета пассажиров определили направление работы авторов – был разработан монтируемый на потолок дверного проема программно-аппаратный комплекс, основанный на применении ультразвукового дальномера (рис. 6), отличающийся минимально возможной себестоимостью по

сравнению с аналогами, стабильностью функционирования в условиях пассажирского транспорта и допускающей реализацию с защитой вплоть до IP67 без потери точности. Полученная разработка может применяться в любых задачах мониторинга потоков людей, например, входящих и выходящих из локаций, а также перемещающихся в пределах контролируемых территорий, в том числе в случаях, когда задачей контроля является не только регистрация факта открытия двери, но и учет количества и направления прохода людей.

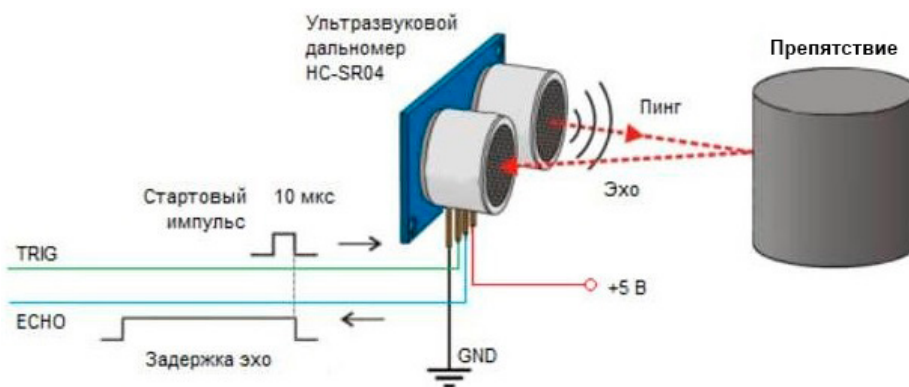


Рис. 6. Общая схема функционирования ультразвукового датчика.

Достоинствами системы учета пассажиров, основанной на ультразвуковых датчиках, являются низкая себестоимость, невосприимчивость к погодным условиям, малая чувствительность к параметрам отражающих поверхностей, большой диапазон рабочих углов и большой угол обзора, возможность использования в ограниченном пространстве. Среди недостатков могут быть выделены: невозможность одновременного полного функционирования нескольких близкорасположенных однонаправленных датчиков и, как следствие, необходимость синхронизации их работы; частичное поглощение звуковой волны одеждой с крупным ворсом; сложности идентификации близкорасположенных объектов в плотном потоке, требующие применения специального математического обеспечения.

Далее рассмотрены примеры задач и результатов опытного применения предложенного авторами программно-аппаратного комплекса. Его работоспособность апробирована и подтверждена результатами обработки исходных данных, фиксируемых ультразвуковым датчиком при движении на вход и выход различных выборок людей, варьируемых по численности, плотности движения и антропометрическим характеристикам. В испытательном стенде имитировались условия низкопольного транспортного средства, высота дверного проема составляла 200 см, а ширина 100 см.

Задача № 1. Учет перемещений отдельных пассажиров

Постановка задачи. Через одинарный дверной проем, без скоплений в обоих направлениях, на вход и выход по очереди перемещаются люди с интервалами не менее 0.5 м между ними. Требуется вести учет количества вошедших и вышедших людей.

Предлагаемое решение. В потолочной части дверного проема размещается модуль регистрации, включающий ультразвуковой датчик, направленный под углом к вертикали (в случае транспортного средства – наружу и под углом, обеспечивающим гарантированное получение отраженного сигнала от края его пола).

Работа комплекса. Перемещающийся человек обнаруживается в отраженном сигнале (рис. 7): при входе – с момента, когда расстояние от его ног или корпуса до даль-

номера становится меньше высоты установки модуля регистрации в дверном проеме, до момента, когда его голова выходит из зоны действия дальномера; при выходе – с момента попадания головы в область действия дальномера до момента, когда расстояние до его ног или корпуса превысит высоту установки модуля регистрации в дверном проеме.

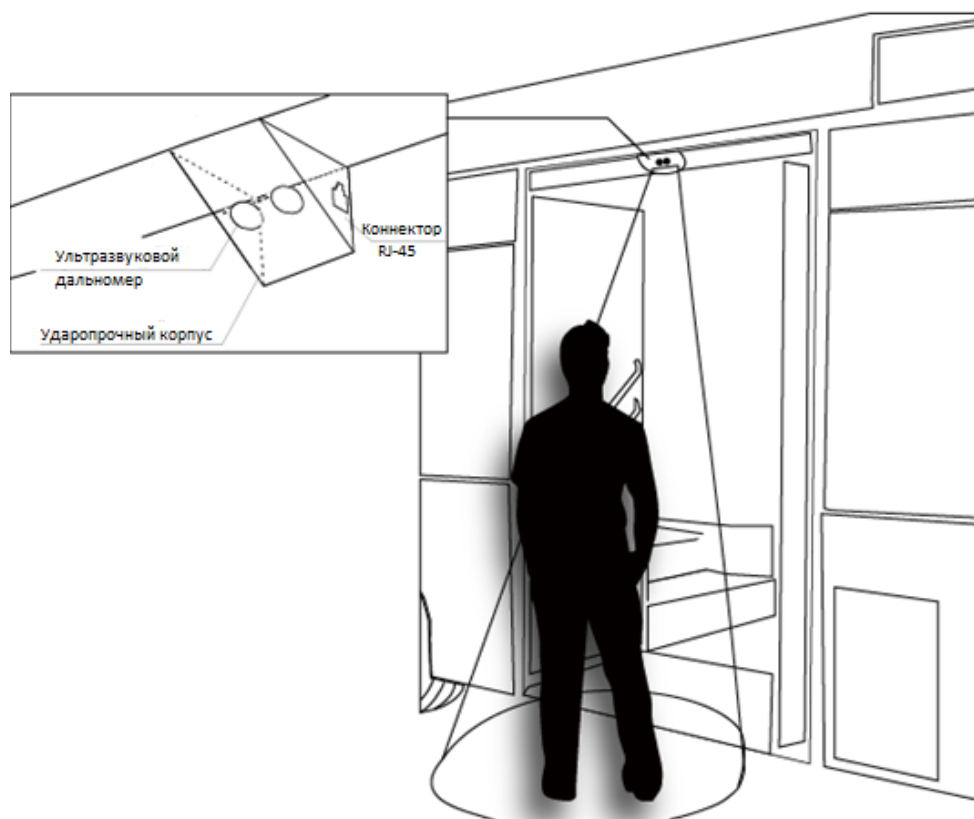


Рис. 7. Проход одного пассажира под модулем регистрации.

Модуль регистрации включается при открытии дверей транспортного средства и выключается в момент их закрытия. Каждые 10 мс дальномер проводит измерение дистанции, при этом значимыми считаются значения меньше, чем высота установки модуля регистрации в дверном проеме. При получении последовательности значимых значений комплекс переходит в режим «отслеживание объекта» и предварительно ее обрабатывает с целью исключения фактов статичного нахождения человека рядом с дверным проемом (без изменения дистанции), например, до начала или после окончания перемещения. Формируемый в результате набор значений дистанции до человека при проходе через дверной проем будем называть целевым – подлежащим дальнейшей обработке – и заметим, что количество значений в каждом наборе зависит от скорости перемещения человека.

Определение количества и направления перемещения людей. На рис. 8 представлены примеры интерполяции целевых наборов значений – результатов измерения дистанции до человека при входе и выходе через дверной проем (с учетом погрешностей измерения). На рис. 8а можно наблюдать, как уменьшается дистанция до человека, осуществляющего посадку, а на рис. 8б – как она увеличивается при высадке пассажира.

Выбросы, подобные наблюдаемому на рис. 8а значению под номером 13, требуют применения специальных методов фильтрации погрешностей. Для решения данной задачи авторами был использован медианный фильтр, воздействующий на резко выделяющиеся значения и не влияющий на монотонную составляющую их последовательности.

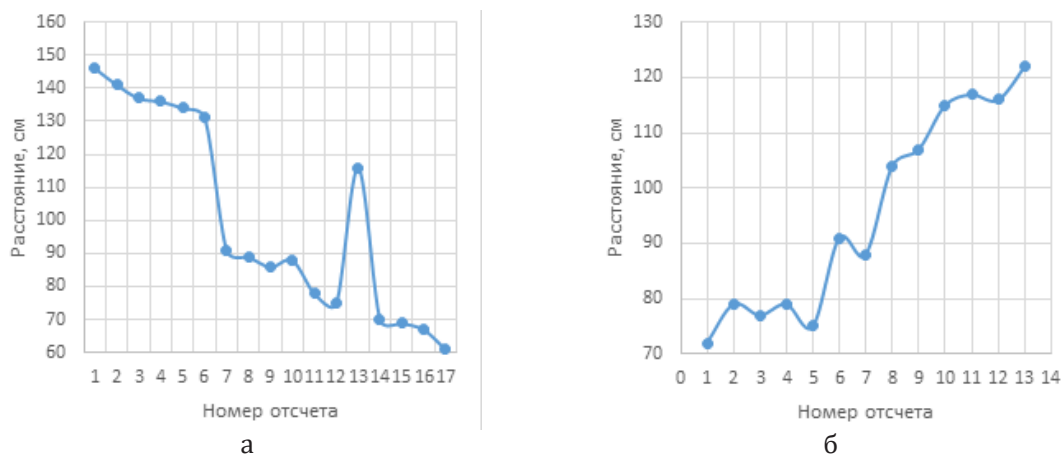


Рис. 8. Исходные данные о дистанции до человека при входе (а) и выходе (б) из транспортного средства.

На рис. 9 представлен результат обработки анализируемых данных медианным фильтром с апертурой (окном) в 3 элемента последовательности. Как видно из рис. 9а, одиночный выброс под номером 13 подавлен, а последовательность на рис. 9б незначительно сглажена.

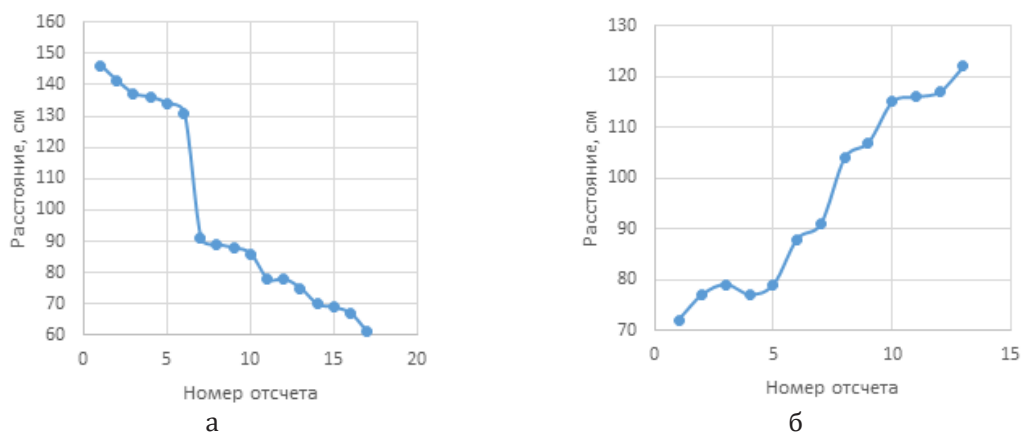


Рис. 9. Обработанные медианным фильтром данные о дистанции до человека при входе (а) и выходе (б) из транспортного средства.

Анализ получаемых после применения медианного фильтра целевых наборов значений сводится к обычной задаче классификации, в которой имеются два класса, обозначающие направление прохода через дверной проем: вход и выход. В данной работе приводится подход к решению рассматриваемой задачи классификации, основанный на построении уравнения линейной регрессии (рис. 10): положительное значение тангенса угла наклона (рис. 10б) соответствует выходу, а отрицательное (рис. 10а) – входу пассажира. Заметим, что абсолютное значение тангенса угла наклона характеризует скорость перемещения человека через дверной проем, однако результаты соответствующего исследования будут изложены в следующих работах авторов.

Так как рассматриваемая задача классификации решается на основании параметра получаемого уравнения линейной регрессии, требуется оценить «качество» данной модели, например, с помощью коэффициента детерминации R^2 . На основании результатов обработки тестовых наборов данных авторами установлено, что соответствующее значение для входа наблюдается в диапазоне от 0.85 до 0.91, а для выхода – от 0.9 до 0.95.

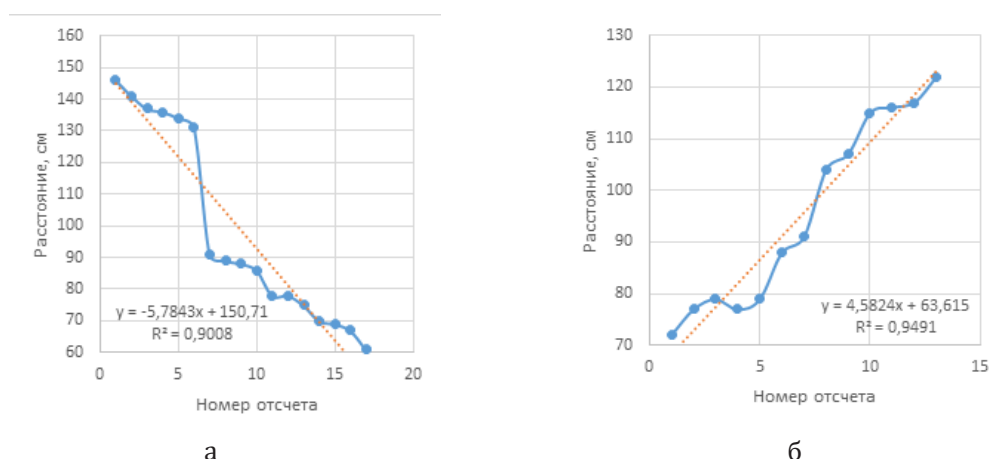


Рис. 10. Результаты построения уравнений линейных регрессий по обработанным медианным фильтром данным, приведенным на рис. 9.

Задача № 2. Учет перемещений скоплений пассажиров

Постановка задачи. Через одинарный дверной проем, формируя скопления в обоих направлениях, на вход и выход по очереди группами различной численности перемещаются люди с минимальным интервалом между ними (вплотную). Требуется вести учет количества вошедших и вышедших людей.

Предлагаемое решение. В потолочной части дверного проема размещаются модуль регистрации, включающий ультразвуковой дальномер, расположенный, как и в предыдущей задаче, а также направленный вертикально вниз лазерный (инфракрасный) дальномер (ИК-сенсор).

Работа комплекса. Перемещающийся человек обнаруживается в отраженном сигнале как ультразвукового, так и лазерного дальномера, при этом показания ультразвукового дальномера позволяют определить направление перемещения людей, а инфракрасного – разделить целевые наборы значений, соответствующие каждому из пассажиров (рис. 11). Скопления людей по обе стороны дверного проема без перемещения на вход и выход всего лишь приводят к постоянной работе комплекса в режиме «отслеживание объекта», соответствующий «шум» может быть легко отфильтрован, так как ему соответствуют наборы значений без существенного изменения (менее 10 см) дальности объекта до ультразвукового дальномера.

Заметим, что в рассматриваемой постановке задачи через дверной проем могут проходить люди с существенно различающимся ростом, предварительно формирующие скопления по обе стороны относительно него, поэтому без лазерного дальномера ультразвуковой датчик не позволял бы гарантированно определить точное количество прошедших на вход и выход людей, так как учитывал бы первую приходящую отраженную волну. Одним из дальнейших направлений работы авторов будет являться разработка математического обеспечения, позволяющего решить рассматриваемую задачу с гарантированной точностью без применения ИК-сенсора.

Каждые 10 мс модуль регистрации проводит два измерения дистанции дальномерами – угловое (ультразвуковым) и вертикальное (инфракрасным). Вертикальное измерение с ИК-сенсора сохраняется только в том случае, если оно меньше порогового, например, 2/3 высоты дверного проема (не учитываются проносимая ручная кладь и пассажиры дошкольного возраста).

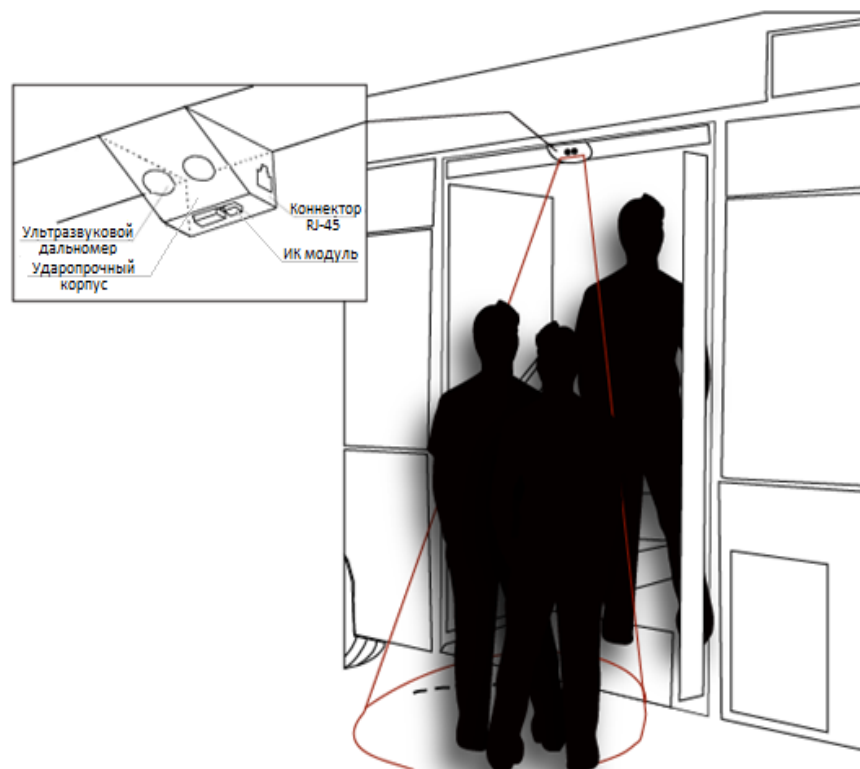


Рис. 11. Проход плотного потока пассажиров под модулем регистрации.

Определение количества и направления перемещения людей. На рис. 12 представлен пример интерполяции трех целевых наборов значений – результатов измерения дистанции ультразвуковым дальномером при проходе на посадку подряд троих пассажиров разного роста. В значениях с порядковыми номерами 15 и 30 наблюдаются фактические выходы первого и второго пассажиров из области видимости ультразвукового датчика. В случае движения с чередованием на вход и вход групп людей большей или меньшей численности обработка соответствующих целевых наборов данных не будет связана с наличием особенностей, не рассмотренных далее для приведенных на рис. 12 наборов данных.

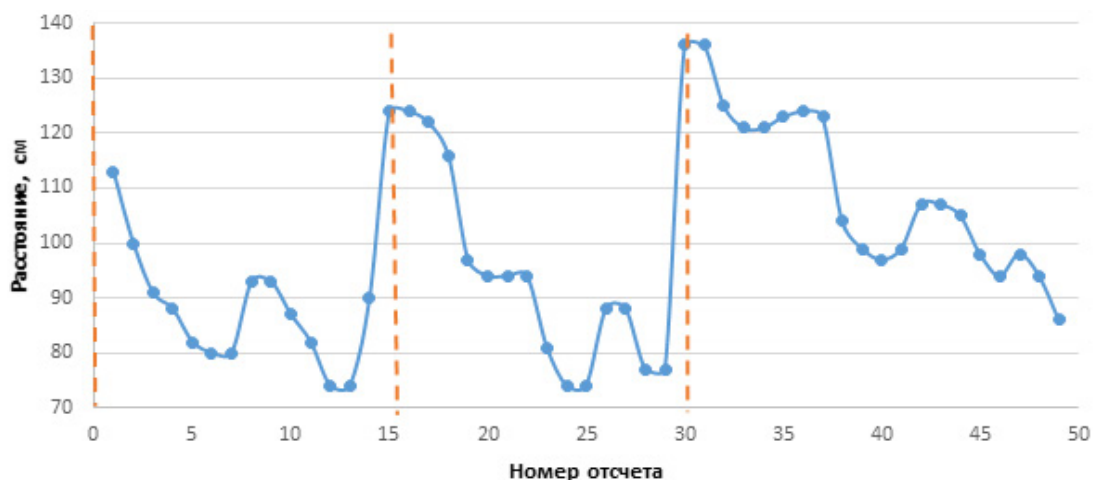


Рис. 12. Данные о дистанции при посадке троих пассажиров без учета времени получения значений.

На рис. 12 можно наблюдать три характерно убывающих участка, два из которых предваряются резким скачком. Данные скачки говорят о том, что один из проходящих пассажиров покидает область видимости ультразвукового дальномера и сенсор начинает фиксировать более дальний объект – следующего пассажира в потоке. При уплотнении потока пассажиров скачки между целевыми наборами значений значительно сокращаются и для их машинного распознавания требуется специальный строгий алгоритм. Данная задача является классической задачей кластеризации, с тем отличием, что исходными данными являются не просто точки некой совокупности, а временной ряд. Для разработки алгоритма кластеризации – распознавания целевых наборов значений, соответствующих отдельным пассажирам, – целесообразно перейти к оси абсцисс, отражающей ход времени, а не очередность получения значений дистанции. Это позволит объективно сопоставить значения, получаемые от двух дальномеров, как с учетом рассинхронизации их работы, так и с учетом возможных потерь некоторых значений в результате отсутствия отраженного сигнала. На рис. 13 показано, как переход к новой оси абсцисс изменил результат интерполяции данных, представленных ранее на рис. 12.

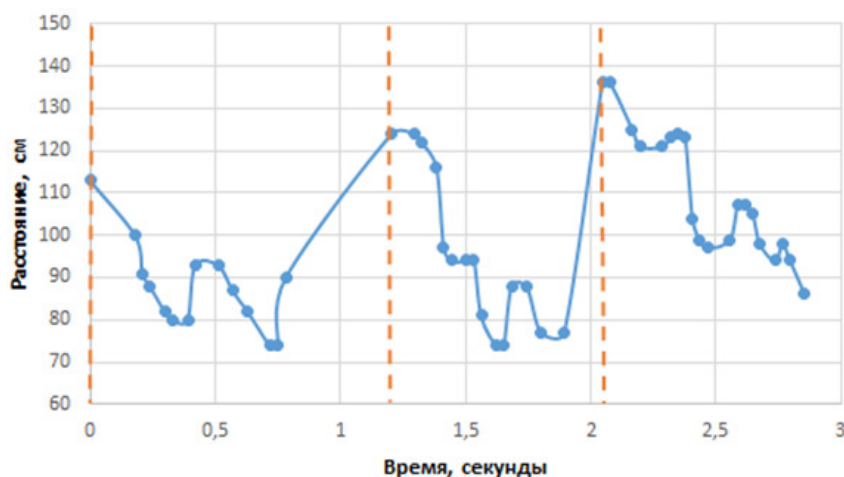


Рис. 13. Данные о дистанции при посадке троих пассажиров с учетом времени получения значений.

На рис. 13 видно, что расстояние между точками по оси абсцисс не является постоянным, в результате чего значения сгруппировались в «сгустки». Так, ранее отмеченные на рис. 12 зоны смены пассажиров в области видимости ультразвукового дальномера стали более явными для машинного распознавания и выделяются не только по оси ординат (расстояние), но и по оси абсцисс (время). Заметим, что при уплотнении потока пассажиров различия между целевыми наборами значений по оси абсцисс сокращаются так же существенно, как и по оси ординат.

Рассмотрим предлагаемый авторами алгоритм кластеризации. Для выделения резких скачков дистанции до объекта могут использоваться следующие подходы: численное дифференцирование – построение ряда значений дискретной производной; расчет модулей разности между каждым следующим значением и предыдущим. Из полученного ряда можно выделить локальные максимумы, которые и будут представлять собой скачки в исходных данных по оси ординат, соответствующие смене людей, перемещающихся на вход и/или выход, в области видимости ультразвукового дальномера. На рис. 14 представлен ряд значений модуля разности между парами соседних данных с рис. 13.

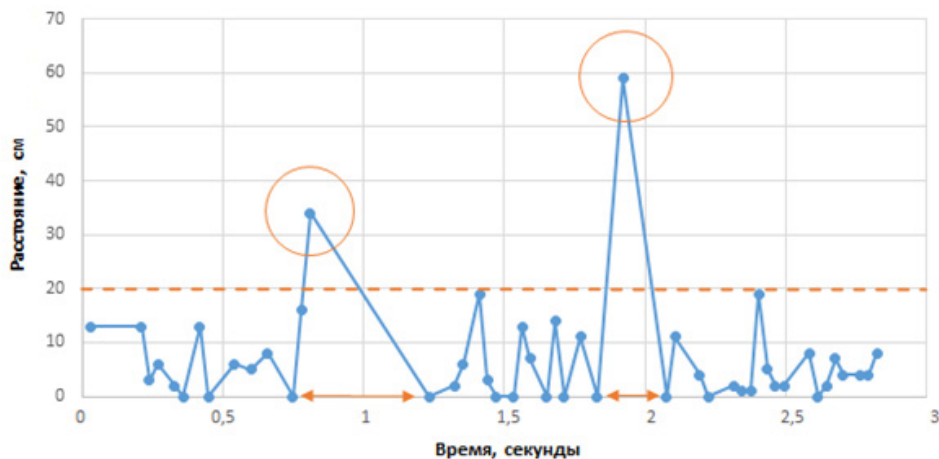


Рис. 14. Значения модуля разности между следующим и предыдущим значением дистанции до объекта, представленными на рис. 13.

На рис. 14 имеются два ярко выраженных локальных максимума, которые сопровождаются большим промежутком по времени относительно соседних точек. Также можно заметить присутствие меньших скачков (менее 20 см дистанции до объекта), обусловленных в большинстве случаев влиянием движений рук, ног и головы человека при проходе через дверной проем, а также отражающими характеристиками одежды (например, меховые поверхности хуже отражают звуковые волны). В связи с этим целесообразно считать все скачки значений, не превышающие некоторого порогового значения (например, 25 см дистанции до объекта), погрешностями измерений, не влияющими на результат кластеризации.

Таким образом, предлагаемый авторами алгоритм кластеризации реализует выбор всех максимумов абсолютного значения дискретной производной, превышающих пороговое значение, и на основании соответствующих им временных координат выполняет деление исследуемого ряда на кластеры, соответствующие целевым наборам значений дистанции до каждого из проходящих через дверной проем пассажиров. На основании каждого из полученных наборов значений, аналогично рассмотренной выше задаче № 1, выполняются построение уравнения линейной регрессии и классификация входа или выхода пассажира из транспортного средства.

Апробация разработанного авторами программно-аппаратного комплекса в условиях плотного потока людей показала, что изложенный выше алгоритм кластеризации может не идентифицировать некоторых пассажиров, объединяя соответствующие им целевые наборы значений с предыдущими или следующими. Данные погрешности могут быть обусловлены как существенными различиями в росте, так и сочетанием условий плотного и быстро перемещающегося потока пассажиров. Так, например, в различных работах по пожарной безопасности указывается, что в случае давки расстояние между людьми может составлять менее 10 см [13]. Совершенствование алгоритма кластеризации будет являться одним из направлений дальнейшей работы авторов, так как использование только ультразвукового дальномера обуславливает минимальную себестоимость разработанного программно-аппаратного комплекса. Однако для объективного учета количества пассажиров в условиях плотного потока на текущем этапе предлагается использовать показания лазерного дальномера. На рис. 15 для рассматриваемого набора исходных данных представлены результаты построения трех уравнений линейной регрессии (аналогично рассмотренной ранее задаче № 1) и приведены наборы показаний лазерного дальномера.

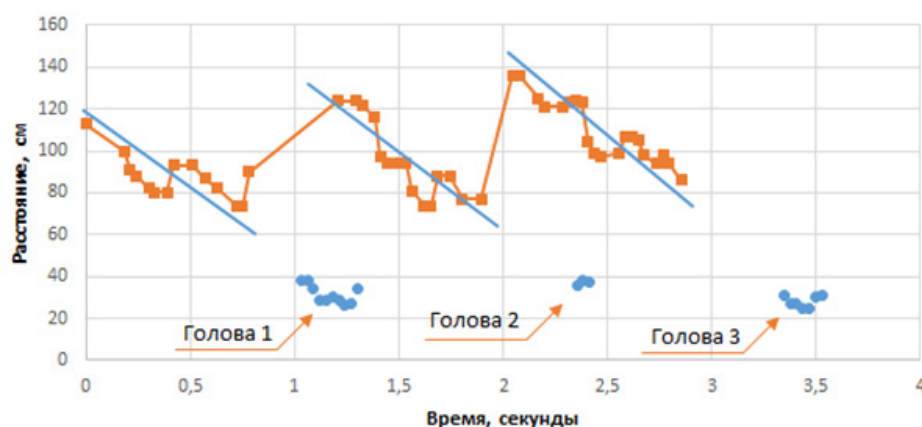


Рис. 15. Данные о посадке троих пассажиров, полученные с двух сенсоров дистанции.

Из рис. 15 видно, что данные ИК-сенсора фиксируются с запаздыванием, вызванным слепой зоной между двумя сенсорами, однако точность распознавания отдельных людей в плотном потоке пассажиров при этом фактически составляет 100%. Изложенные выше методы и математическое обеспечение реализованы в программном обеспечении разработанного авторами комплекса.

Аппаратное обеспечение разработанного комплекса

Предложенный авторами программно-аппаратный комплекс в своей текущей реализации состоит из нескольких компонент, каждую из которых можно отнести к регистрирующему или контролирующему модулям, соединяемым с помощью кабеля витой пары и стандартного интерфейса RJ-45. Модуль регистрации, заключенный в ударопрочный корпус и размещаемый на потолке дверного проема, представляет собой ультразвуковой дальномер, используемый отдельно или в комплекте с инфракрасным датчиком дистанции. Модуль контроля представляет из себя печатную плату с микроконтроллером STM32, анализирующим поступающие значения дистанций до объектов, ведущим учет количества прошедших на вход и выход пассажиров и передающим соответствующие данные в штатные модули связи транспортного средства.

В табл. 1 приведены состав и примерная себестоимость комплектации предложенного комплекса для рассмотренных выше задач № 1 и № 2 в условиях его применения для одного одинарного дверного проема.

Таблица 1. Состав и примерная себестоимость комплектации комплекса

Устройство	Назначение	Применение		Цена, руб.
		Задача 1	Задача 2	
Контроллер STM32F401RE	Выполняет обработку значений дистанции до объектов, передает данные о количестве вошедших и вышедших пассажиров в штатные модули связи транспортного средства.	+	+	от 150
Ультразвуковой дальномер HC-SR04	Измеряет расстояния до проходящих через дверной проем людей.	+	+	от 50
ИК-дальномер SHARPGP2Y0A02YK0F	Измеряет расстояние до голов проходящих через дверной проем людей.	–	+	от 300
Концевой выключатель	Обеспечивает учет открытия и закрытия двери.	+	+	от 50
Стоимость компонентов комплекса (без корпуса)		от 250 руб.	от 550 руб.	

На рис. 16 приведены чертежи вариантов корпуса разработанного программно-аппаратного комплекса, применяемого в условиях одинарного дверного проема, цифрами 1 и 2 обозначены соответственно места установки ультразвуковых и инфракрасных дальномеров. Вариант изделия с двумя ультразвуковыми дальномерами является экспериментальным – в следующих работах авторов будут изложены результаты исследования возможностей исключения из состава комплекса лазерного дальномера без потери точности результатов распознавания перемещения плотных скоплений объектов.

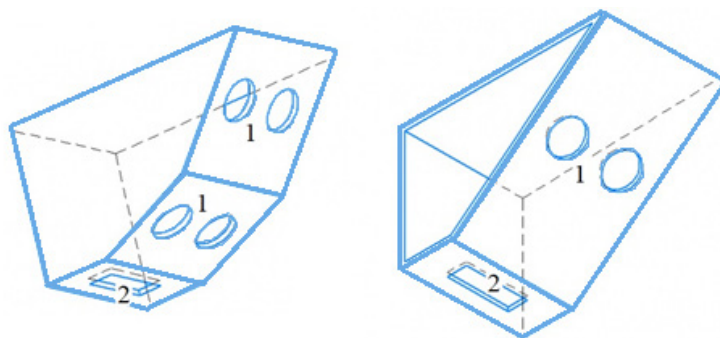


Рис. 16. Варианты корпуса изделия для одинарного дверного проема.

В условиях дверных проемов произвольной ширины может применяться вариант комплекса, чертеж корпуса которого представлен на рис. 17, цифрами 1 и 2 обозначены соответственно места установки ультразвуковых и лазерных дальномеров.

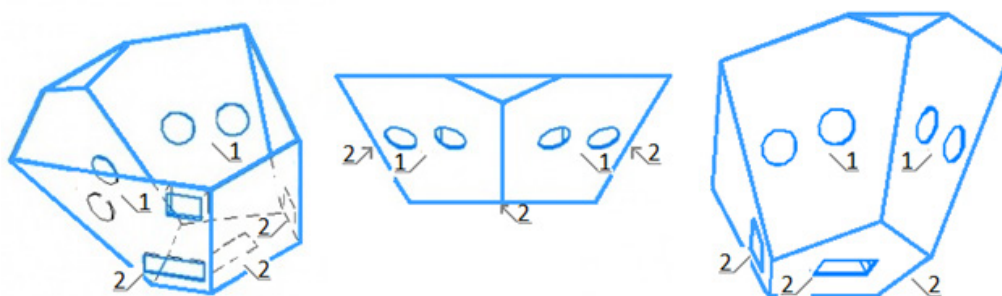


Рис. 17. Вариант корпуса изделия для дверного проема произвольной ширины.

На рис. 18 приведен общий пример применения варианта комплекса для контроля дверного проема произвольной ширины: в условиях двойного по ширине проема может применяться средний модуль с тремя лазерными дальномерами; в тройных по ширине проемах могут применяться стартовый и конечный модули с двумя лазерными дальномерами каждый; в условиях четырехкратного по ширине проема могут применяться стартовый, средний и конечный модули (данный вариант приведен на рис. 18); для проемов большей ширины потребуется увеличивать количество средних модулей (фактически доступная для контроля ширина дверного проема не ограничена).

Сравнение разработанного комплекса с аналогами

В табл. 2 приведены результаты качественного сравнения предложенной авторами разработки с существующими аналогами: лучшее значение параметра оценивается в 2 балла, среднее – в 1 и худшее – в 0 баллов. Однако заметим, что разработанный программно-аппаратный комплекс выгодно отличается от аналогов минимально возможной себестоимостью комплектующих и гарантированной точностью функционирования.

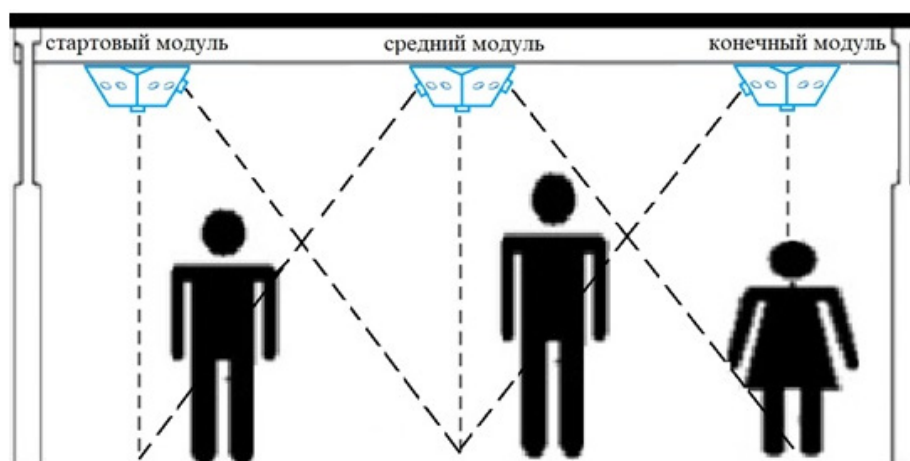


Рис. 18. Общий пример использования комплекса для контроля дверного проема произвольной ширины.

Таблица 2. Результаты качественного сравнения разработки с существующими аналогами

Параметр сравнения	Системы с лазерными датчиками	Системы с тепловизорами	Системы с компьютерным зрением	Системы с регистрацией веса	Разработка авторов
Требуемые вычислительные мощности	малые (2)	средние (1)	высокие (0)	средние (1)	малые (2)
Сложность монтажа	малая (2)	средняя (1)	средняя (1)	высокая (0)	малая (2)
Точность регистрации людей	средняя (1)	высокая (2)	высокая (2)	низкая (0)	высокая (2)
Стоимость	средняя (1)	высокая (0)	высокая (0)	средняя (1)	низкая (2)
Ремонтопригодность	средняя (1)	низкая (0)	низкая (0)	низкая (0)	средняя (1)
Техническая сложность	низкая (2)	высокая (0)	высокая (0)	средняя (1)	низкая (2)
Объем полезной информации	средний (1)	высокий (2)	высокий (2)	средний (1)	высокий (2)
Скрытность	средняя (1)	средняя (1)	средняя (1)	высокая (2)	средняя (1)
ИТОГО (из 16)	11	7	6	6	14

Предложенная авторами разработка имеет некоторые существенно уступающие по уровню готовности к практическому применению аналоги, основанные на таком же (ультразвуковом) физическом принципе функционирования [14, 15], но использует математическое и программное обеспечение, гарантированно выполняющееся на любом контроллере семейства STM32. Регистрирующий модуль исполнен в ударопрочном корпусе, обеспечивающем простую монтаж и возможность установки элемента автономного питания. Испытания показали, что в условиях формирования скоплений и смены направлений перемещения пассажиров на вход и выход с минимальным интервалом между ними (вплотную) комплекс, с имеющимся программным обеспечением и без применения лазерного дальномера, верно определяет количество вошедших и вышедших людей в 7 из 10 случаев. С применением лазерного дальномера точность распознавания людей в потоке составляет 100%.

Выполненные авторами исследования основывались на предположении об использовании комплекса в условиях низкопольного транспорта, однако разработанное матема-

тическое обеспечение может быть легко адаптировано и к условиям наличия в дверном проеме ступеней. Точность определения количества прошедших пассажиров на основании показаний ультразвукового дальномера при этом существенно возрастет благодаря наличию резких изменений расстояния до человека при переходе между ступенями.

Заключение

Разработанный авторами программно-аппаратный комплекс позволяет решить задачу учета пассажиров на каждом отдельном транспортном средстве в режиме реального времени, имеет преимущества перед существующими аналогами и доступен для массового внедрения. Помимо общественного транспорта, данная разработка может применяться для учета численности: людей, проходящих через статичные дверные проемы, лестничные пролеты и по полотнам эскалаторов (на станциях метрополитена, в магазинах и т. п.); транспортных средств, проезжающих через контрольно-пропускные пункты (на парковках, в туннелях, на платных трассах и т. п.); физических объектов, перемещаемых в системах автоматического управления логистическими потоками, и т. д. Изложенный в статье материал соответствует применению разработанного программно-аппаратного комплекса в условиях одинарного дверного проема, в следующих работах авторов будут изложены материалы, раскрывающие аспекты его адаптации к применению в условиях проемов произвольной ширины.

Литература:

1. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса. М.: Экономика, 2010. 256 с.
2. Шваб К. Четвертая промышленная революция. Пер. с англ. М.: Эксмо, 2019. 209 с.
3. Шмидт А.В., Антонюк В.С., Франчини А. Городские агломерации в региональном развитии: теоретические, методические и прикладные аспекты // Экономика региона. 2016. Т. 12. Вып. 3. С. 776–789.
4. Утешев К.А. Автоматический подсчет пассажиров общественного транспорта. Основные технические требования и подходы к реализации // Мир компьютерной автоматизации. 2015. Вып. 1. С. 35–39.
5. Войновский В.А., Купцов А.В. Причины некорректных измерений дальностей с помощью лазерных дальномеров, используемых в вооруженных силах // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2013. Т. 5. Вып. 2. С. 165–169.
6. Валуйская Я.А. People counting using data gathered via Microsoft Kinect Sensor // GraphiCon2015: Междунар. конф. Протвино, 22–25 сентября 2015. Протвино: Автономная некоммерческая организация «Институт физико-технической информатики», 2015. С. 205–208.
7. Кобзистый С.Ю. [и др.] Перспективы применения устройств тепловизионного контроля на объектах охраны ФСИН России // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России, 2018. С. 23–25.
8. Берников В.В., Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Анализ алгоритмов обнаружения движущихся объектов на видеоизображении // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. Вып. 3. С. 223–233.
9. Ильясов Э.С. Вычисление расстояния до наблюдаемого объекта по изображениям со стереопары // Молодой ученый. 2016. Т. 118. Вып. 14. С. 146–151.
10. Брусянин Д.А. Интеллектуальная система мониторинга пассажиропотока в электропоезде «Ласточка» // Инновационный транспорт. 2015. Т. 16. Вып. 2. С. 16–21.
11. Парфенко А.П. Методология моделирования людских потоков и практика программирования их движения // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. Вып. 12. С. 46–55.
12. Гончаров И.С. Счетчик посетителей на ультразвуковых дальномерах // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: Междунар. науч. конф. Томск: Томский политехнический университет, 2015. С. 131–132.
13. Усов С.П. [и др.] О разработке программно-аппаратного комплекса автоматического определения пассажиропотока городского пассажирского транспорта // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. матер. 94 Междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров. 2016. С. 248–253.

References:

1. Glazyev S. The strategy of Russia advancing development in the conditions of global crisis. Moscow: Ekonomika Publ., 2010. 256 p. (in Russ.).
2. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. New York: Crown Business, 2017. 192 p. [Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Moscow: Eksmo Publ., 2019. 209 p. (in Russ.).]
3. Shmidt A.V., Antonyuk V.S., Francini A. Urban agglomerations in regional development: Theoretical, methodological and applied aspects. *Ekonomika regionov* = Economy of Regions. 2016;12(3):776-789 (in Russ.).
4. Uteshev K.A. Automatic public transport passengers count: Basic technical requirements and approaches to implementation. *Mir komp'yuternoi avtomatizatsii* = Computer Automation World. 2015;(1):35-39 (in Russ.).
5. Voynovskiy V.A., Kuptsov A.V. The reasons of incorrect metering of range with the help of laser range finders, using in the armed forces. *Interexpo GEO-Sibir'* = Interexpo GEO-Siberia. 2013;5(2):165-169 (in Russ.).
6. Valuiskaia I.A. People counting using data gathered via Microsoft Kinect sensor. *International Conference GraphiCon2015*. Protvino, September 22-25, 2015. Protvino: Institute of Physicotechnical Informatics, 2015; pp. 205-208 (in Russ.).
7. Kobzistiy S.Yu. [et al.]. Prospects of using heat monitoring equipment on RF FSEP protected sites. Technology and safety of objects in the penal and correctional system: a collection of materials of the International scientific-practical conference. Voronezh: Voronezh Institute of FSEP of Russia, 2018; pp. 23-25 (in Russ.).
8. Bernikov V.V., Preobrazhenskiy A.P., Choporov O.N. Analysis of algorithms for detecting moving objects in the video image. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* = Modeling, Optimization and Information Technology. 2018;6(3):223-233 (in Russ.).
9. Ilyasov E.S. Calculating the distance to a surveyed object using images from a stereogram. *Molodoi uchenyi* = Young Scientist. 2016;118(14):146-151 (in Russ.).
10. Brusyanin D.A. Intelligent system of passenger flow monitoring in electric train "Lastochka" ("Swallow"). *Innovatsionnyi transport* = Innovative Transport. 2015;12(3):16-21 (in Russ.).
11. Parfyenenko A.P. Methodology for modeling human movements and practice of programming their movement during evacuation. *Pozharovzryvobezopasnost'* = Fire and Explosion Safety. 2014;23(12):46-55 (in Russ.).
12. Goncharov I.S. Visitor counter based on ultrasonic range finders. *Information technologies in science, management, social sphere and medicine: International Scientific Conference*, 2015; pp. 131-132 (in Russ.).
13. Usov S.P. [et al.] About development of hil-testbench for automatic detection of passenger traffic of urban passenger transport. *Pilotless vehicles: Problems and prospects: International Scientific Conference of the Association of Automotive Engineers*, 2016; pp. 248-253 (in Russ.).

Об авторах:

Зуев Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Файчук Дмитрий Владимирович, оператор ЭВМ, кафедра практической и прикладной информатики, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Andrey S. Zuev, Cand. od Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Dmitriy V. Faichuk, Computer Operator, Department of applied informatics, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).