

УДК 004.93+62.51+625.03

## АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПОМОЩЬЮ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

**Д. Е. Обертов**<sup>1</sup>,

аспирант

**В. М. Бардов**<sup>2</sup>,

аспирант

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Рассматриваются проблемы обнаружения транспортных средств с помощью акселерометров. Описан алгоритм для обнаружения транспортных средств и разделения во времени одного автомобиля от другого. Приведены результаты обработки данных с помощью алгоритма и показана его эффективность.

**Ключевые слова** — акселерометр, обнаружение, транспортное средство, интеллектуальные транспортные системы.

### Введение

В настоящее время в разных странах разрабатываются и внедряются интеллектуальные транспортные системы различного назначения.

Масштабная установка в современных транспортных средствах (ТС) систем дорожной безопасности водителей, таких как подушки безопасности, привела к снижению смертности в дорожно-транспортных происшествиях. Например, в США благодаря подушкам безопасности в 2009 г. была спасена жизнь более 28 200 человек [1].

Типичные сценарии, которые часто приводят к серьезным столкновениям, — это левые повороты на перекрестках или обгоны на двухполосной дороге с двусторонним движением [2]. В последней ситуации перспективным средством избежать возникновения аварийных условий является использование «компьютерного помощника», представляющего собой комплекс аппаратных и програм-

мных средств в целях оказания помощи водителю при обгоне [3]. Он использует прогнозируемое время прибытия следующего встречного ТС, основанное на собственной скорости движения, предшествующем и обгоняющем ТС для информирования водителя о том, безопасен или нет обгон.

Аналогичная система дорожного руководства (помощи) основана на определении опасных изменений полос движения с помощью комбинации сигналов, обработанных радаром, и визуальной информации [4]. Отличие этой системы заключается в том, что она умеет среди других сценариев распознавать встречные ТС и предупреждать водителя о смене полосы движения. Однако возможности радара и датчика поля зрения визуальных систем имеют ограничение в диапазоне работы. Определение поворотов, подъемов или даже большие расстояния могут стать проблемой для таких систем.

Другие подходы, преодолевающие эти ограничения, основаны на системах, в которых отдельные ТС обмениваются данными друг с другом, предоставляя водителям взаимную информацию [5, 6]. Недостатками этих подходов, в частности, является то, что каждый автомобиль должен быть оснащен соответствующей системой, и только ограниченная информация об окружении, например состояние дороги, препятствия и направление движения, доступна.

Современные автомобили снабжены высокоинтеллектуальными системами безопасности, но

<sup>1</sup> Научный руководитель — доктор технических наук, профессор кафедры СУиИ Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики *Б. Р. Андриевский*.

<sup>2</sup> Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент кафедры СУиИ Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики *С. В. Арановский*.

не каждый водитель имеет возможность купить такую машину, именно поэтому в развитых странах мира создается интеллектуальная дорожная инфраструктура. Еще один способ сделать дорожное движение безопаснее — это наблюдающаяся в последние годы тенденция к кооперативной инфраструктуре [7—14]. Сейчас существует много проектов, которые направлены на развитие интеллектуальной дорожной инфраструктуры в виде датчиков дорожной разметки, объединенных беспроводной сетью. Датчики обмениваются информацией как между собой, так и с серверами, расположенными за пределами дороги. Идея основана на автономном транспортном и дорожном контроле со стороны каждого датчика.

Датчики крепятся на дорожное покрытие, а точнее, приклеиваются на дорожную разметку специальным клеем, получая питание от солнечных батарей. Датчики могут, например, передать специальные сигналы водителю, поменяв цвет или начав мигать за несколько сотен метров до начала полосы гололеда или какой-то другой критической ситуации. Датчики также могут передавать сигнал близстоящему дорожному знаку, который начнет мигать, предупреждая водителей о необходимости сбросить скорость, сменить полосу движения и т. д.

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) — это системное взаимодействие современных информационных и коммуникационных технологий и средств автоматизации с транспортной инфраструктурой, транспортными средствами и пользователями, которая направлена на повышение безопасности и эффективности транспортного процесса, комфортности для водителей и пользователей транспорта [11, 13]. Развитие ИТС основано на системном подходе, т. е. создание ИТС ведется в направлении целостной инфраструктуры, а не отдельных модулей. Формируется единая открытая архитектура системы и протоколы обмена информацией [11—17]. В ИТС используются различные виды беспроводной связи, но широкое применение сейчас нашел стандарт IEEE 802.11 (Wi-Fi) [9—17]. Современные разработки в технологиях встраиваемых систем позволяют использовать операционные системы реального времени, а также более высокоуровневые приложения, дающие возможность применять эти разработки в области искусственного интеллекта.

Однако существует необходимость создания ИТС нового поколения, которая соответствует сценарию инновационного развития. В данном подходе требуется определить характерные параметры ТС. Определение параметров имеет важное значение для выявления транспортных

сценариев, мониторинга движения и использования дороги или прохождения в реальном времени ТС с информацией для водителей.

### Проблемы, стоящие при решении задач ИТС

*Обнаружение ТС и определение числа его осей.* Главными проблемами являются подсчет транспортных средств и определение количества осей каждого ТС, что можно рассматривать как две наиболее важные задачи. Информация о проезжающих автомобилях необходима для мониторинга дорожного движения; подсчет количества осей ТС помогает определять классы ТС и дает информацию, по которой другие параметры движения могут быть оценены.

*Обнаружение прицепа ТС и определение его типа.* Информация о прицепе, соединенном с автомобилем, является существенной для определения класса ТС. Кроме того, обнаружение прицепа, каким-либо образом соединенного с ТС, и определение количества осей ТС с прицепом так, чтобы прицеп не рассматривался в качестве индивидуального ТС, также является важным параметром ТС.

*Скорость и направление движения (курсовой угол) ТС* (рис. 1) служат для определения транспортных сценариев и обеспечения помощи водителю, например, чтобы водитель замедлил скорость автомобиля на повороте, на котором дорожное покрытие затянато льдом, в противном случае текущая скорость может привести ТС к заносу или аварии. Кроме того, курсовой угол может быть полезен при расчете таких намерений водителя, как перестроение или обгон ТС.

*Колесная база ТС.* Объединяя данные по количеству осей ТС и скорость автомобиля, нетрудно рассчитать колесную базу ТС (расстояние между соседними осями ТС) (см. рис. 1), которая является показателем для идентификации класса ТС, например, автобусы легко отличить от легковых автомобилей, определив только расстояние между осями.



■ Рис. 1. Некоторые наиболее важные параметры ТС

*Боковое положение ТС* (см. рис. 1) имеет главнейшее значение для предвидения возможных несчастных случаев или опасных ситуаций. По оценке боковых положений ТС на дороге можно также определить полосу движения, в которой находится ТС, или изменение водителем полосы движения. Обладая этой информацией, можно, например, прогнозировать аварии и опасные маневры обгона.

*Нагрузка на ось ТС* также является параметром для определения классов автомобилей. В соответствии с нагрузкой на ось легко отличить тяжелые ТС от легких. Данная информация может быть необходимой, когда речь заходит о прогнозировании нарушения дистанции движения с целью избежать столкновения или просто предупреждении водителя о малом расстоянии между ТС. Кроме того, нагрузка на ось — значимый параметр для определения перегруженных ТС, которые слишком тяжелы для конкретной дороги. В рамках ремонта дорог нагрузка на ось также интересна — по ней можно отследить износ дороги.

*Определение классов ТС* производится по нескольким различным критериям для различных приложений и целей. Наиболее очевидным применением, конечно, является мониторинг и статистика описания движения транспорта в одной определенной точке. Еще одно приложение, также по безопасности дорожного движения, — фильтрация запрещенных ТС.

Рассмотрим пример, в котором мост предназначен только для легких ТС, не превышающих определенного веса. Тяжелый грузовик, игнорируя это ограничение, продолжает движение по мосту, в результате чего мост, скорее всего, обрушится. Транспортная инфраструктура, обладая информацией о классе ТС, может заблаговременно предупредить водителя грузовика не продолжать дальнейшее движение. Разумный, с точки зрения безопасности дорожного движения, набор классов для автомобилей включает легковые автомобили, легкие грузовики, тяжелые грузовики, грузовики с одним или несколькими прицепами и легковые автомобили с прицепом [18].

### Мотивация для разработки алгоритма

Есть много систем, доступных для транспортного мониторинга и определения ТС. Индуктивные петли, например, обычно применяют для подсчета ТС и при использовании в парах, а также для оценки скорости [19—21]. Недостатком петель является необходимость перекрывать движение транспорта при монтаже датчиков. Индуктивные петли не могут быть развернуты в больших масштабах, так как это очень дорого, занимает много времени и датчики сами по себе

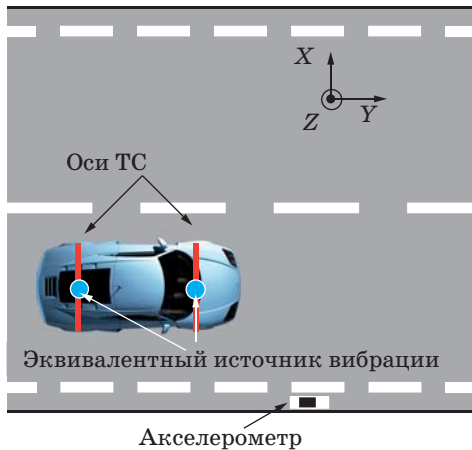
имеют слишком короткий срок службы из-за прямого воздействия ТС [20, 21]. Некоторые из проблем индуктивных петель могут быть преодолены с помощью применения других видов датчиков: видеокамер, инфракрасных, микроволновых и ультразвуковых радаров [21]. Такие датчики можно установить вдоль дорог легко, не приводя к нарушению дорожного движения во время установки. Однако для таких систем нужна большая вычислительная мощность и, следовательно, они слишком дорогие для широкомаштабного развертывания [18—21].

Перспективным подходом является использование магнитометров для обнаружения ТС — в этой области проведено много исследований [7, 8, 10, 22, 23]. Магнитометры дешевы, менее восприимчивы, чем индуктивные петли, к влиянию движения, их можно изготовить в больших количествах и использовать там, где индуктивные петли использовать невозможно, например на мостах [21].

Недостатками магнитометров является то, что они имеют возможность только обнаруживать ТС и делать основную простую идентификацию классов транспортных средств. Для оценки более сложных параметров, таких как скорость ТС, необходимо, по крайней мере, два таких датчика, которые должны быть идеально синхронизированы [7—22]. Есть методы определения скорости ТС с одним магнитометром, но точность их недостаточно высока.

Для преодоления этих ограничений авторами данной статьи был выбран другой подход. Вибрации дорожного покрытия, вызванные ТС, могут нести больше информации, чем отклонения магнитного поля Земли, измеряемые индуктивными петлями или магнитометрами. Электронные акселерометры малых размеров могут быть спроектированы таким же образом, как и магнитометры [18, 24].

Малые встраиваемые системы похожи на системы с магнитометрами, упомянутыми выше. Они могут быть развернуты быстро и в больших масштабах, например, на стороне дороги. Проведено несколько исследований по влиянию транспорта на дорожное покрытие [14—17]. Однако лишь минимальные выводы были сделаны, чтобы связать вибрации транспорта с оценкой параметров движения. В работах [17, 23] дается более развернутое исследование акселерометров, но имеется ограничение в разработанных алгоритмах обнаружения и подсчета количества ТС [18, 24]. Проблема подхода этих алгоритмов заключается в том, что в них используется априори информация о количестве осей ТС, которая не дает возможности практически применять рассматриваемые алгоритмы.



■ Рис. 2. Эквивалентный источник вибрации

Настоящая работа предназначена для решения проблемы обнаружения ТС, подсчета количества их осей и восполнения пробела в теоретической информации о дорожных вибрациях, вызванных проезжающими ТС.

**Реализация алгоритма**

Общим и простым предположением при рассмотрении ТС, движущегося вдоль дороги, является, что каждая колесная пара (ось) вызывает вибрацию, распространяющуюся в асфальте как волна. Поэтому для ТС с  $M$  осями вибрации можно рассматривать как происходящие из  $M$  эквивалентных источников (рис. 2).

Соответственно, вибрации, происходящие от различных осей, достигают датчика с задержкой  $\Delta t$  в зависимости от колесной базы  $b$  (пространственное разделение источников) и скорости ТС  $V$ . Отметим, что двойственность между колесной базой и скоростью существует:

$$\Delta t = b/V. \tag{1}$$

Модель вибрационной характеристики одной оси (рис. 3, а) можно описать импульсом  $p_i(t)$ , имеющим определенную амплитуду и ширину. Форма импульса может быть представлена гауссовой кривой [18]

$$p_i(t) = A_i \exp\left(-a_i(t - t_i)^2 / 2\right), \tag{2}$$

где  $A_i = 1$ ;  $a_i = 2$ ;  $t_i = 5$ .

Данные параметры импульса определяют ширину, амплитуду и смещение импульса от начала координат.

Для ТС, которое имеет  $n$  осей, модель может быть представлена как суперпозиция импульсов  $p_i(t)$ :

$$Ml(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t). \tag{3}$$

Например, модель легкового автомобиля с параметрами  $n=2$ ,  $A_1=2$ ,  $a_1=2$ ,  $t_1=3$ ,  $A_2=1$ ,  $a_2=6$ ,  $t_2=5$  представлена на рис. 3, б.

Также модель требует учета помех  $n(t)$  (рис. 4):

$$M(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) + n(t), \tag{4}$$

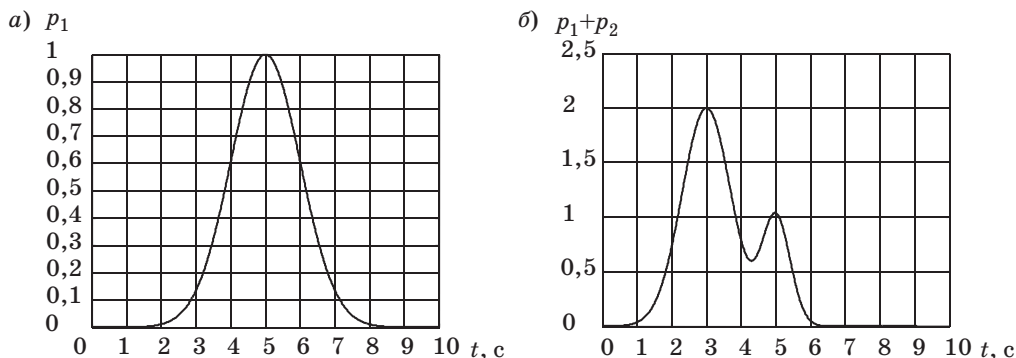
$n(t)$  может быть представлена как квадрат белого гауссова шума.

Если временной интервал  $\Delta t$  умножить на скорость автомобиля  $V$ , мы получим колесную базу — расстояние между соседними осями

$$W = V\Delta t. \tag{5}$$

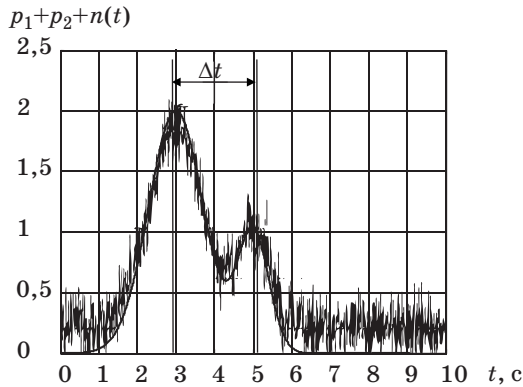
Мы будем использовать эту математическую модель вибрационной характеристики для разработки алгоритма обнаружения ТС и подсчета количества осей ТС. Эта модель — первый шаг для описания алгоритма.

Алгоритм обнаружения ТС показан на рис. 5. Он осуществляется согласно представленным шагам.



■ Рис. 3. Модель вибрационной характеристики одной оси  $p_i(t)$  (а) и легкового автомобиля (б)





■ Рис. 4. Характерный график вибрационной характеристики легкового автомобиля с помехами

Мощность сигнала  $w[n]$  есть квадрат сигнала после полосового фильтра. Рассмотрим сглаживание скользящим окном подробнее. Сигнал энергии оценивается локально путем интегрирования мощности сигнала в течение последних  $K$  образцов (сглаживанием скользящим окном). В результате кривую назовем энергией  $s[n]$ . Интеграл вычисляется с помощью кумулятивных сумм вида

$$s[n] = \sum_{i=0}^{K-1} w[n-i] = \dots = s[n-1] + w[n] - w[n-K]. \quad (6)$$

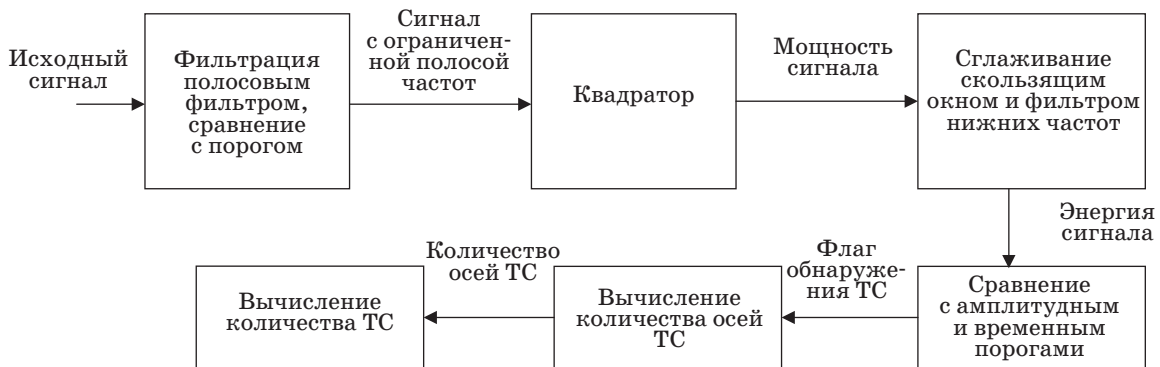
В связи с ограниченной длиной от суммы (6) поток вернется к энергетическому уровню шума после определенного времени бездействия.

Таким образом, количество шагов интегрирования (суммирования)  $K$  имеет решающее значение. Малая величина  $K$  даст очень точную оценку энергии, но чувствительную к помехам, в то время как высокие значения являются более надежными, но их точность оказывается ниже.

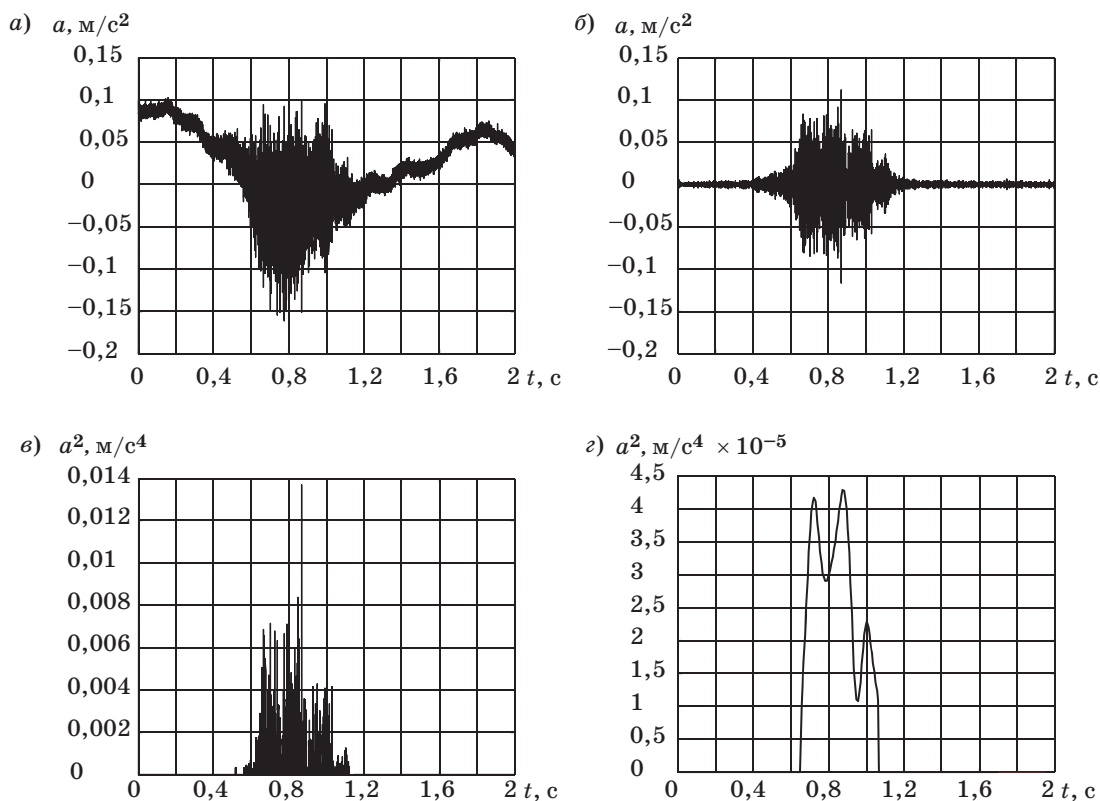
Измеряемый сигнал предварительно фильтруется, возводится в квадрат и сглаживается скользящим окном и фильтром нижних частот для расчета энергии. На рис. 6, *a—г* показан пример обнаружения легкового автомобиля с прицепом. Количество осей может быть найдено очень легко по рис. 6, *г* путем анализа производной сигнала, т. е. нахождением количества максимумов сигнала.

Энергетическая оценка затем используется для обнаружения изменений в энергии, т. е. повышение уровня энергии предполагает более высокую сейсмическую активность, ориентировочно вызванную ТС. Наиболее простой путь для обнаружения ТС — считать отрезки, когда энергия превышает амплитудный порог  $G$ . Однако амплитудного порога самого по себе недостаточно, поскольку он также создает определенные проблемы. Если мы изучаем автомобиль с длинной колесной базой (или, наоборот, низкой скоростью), поток энергии может уменьшиться ниже порога после первой оси, а затем превысить порог снова, когда энергия увеличится за счет второй оси. Чтобы избежать ложных сигналов тревоги, в таких случаях вводится временной порог  $T_G$  [18—20]. Пока разница во времени между последним превышением порога  $t_{last}$  и текущим временем  $t$  меньше, чем временной порог  $T_G$ , предполагается, что любое превышение порога обусловлено этим же ТС (рис. 7).

Выбор двух параметров (амплитудного  $G$  и временного  $T_G$  порогов) имеет решающее значение и напрямую влияет на вероятность ложного обнаружения и ошибок. Низкопороговое решение позволяет обнаруживать ТС, которые имеют только низкий уровень энергии, но повышает вероятность ложного обнаружения в связи с другими сейсмическими возмущениями или наличием ТС в соседних полосах в то же время [18—20]. Высокопороговое решение, очевидно, уменьша-



■ Рис. 5. Последовательность действий по обнаружению и подсчету количества ТС



■ **Рис. 6.** Пример обнаружения ТС и определения количества осей (легковой автомобиль с прицепом,  $V=22$  м/с):  $a$  — исходный сигнал;  $b$  — сигнал после полосового эллиптического фильтра;  $c$  — после возведения в квадрат;  $z$  — после сглаживания скользящим средним и фильтром нижних частот

ет вероятность ложного обнаружения ТС, но не позволяет обнаруживать некоторые ТС.

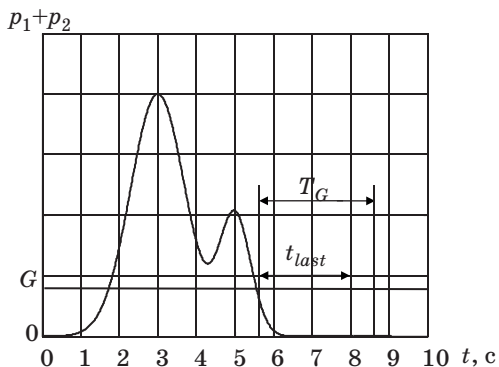
Амплитудный порог следует рассчитывать исходя из желаемой вероятности обнаружения ТС (99,9 %).

Второй параметр — временной порог — определяет, какая должна быть минимальная разница во времени между двумя ТС в ряду. Небольшой временной порог дает обнаружение ТС

с короткими интервалами следования, но увеличивает вероятность ложного обнаружения в связи с многочисленными обнаружениями одного и того же ТС. Долгий временной порог, с другой стороны, снижает частоту ложных обнаружений, но увеличивает количество пропущенных (необнаруженных) ТС.

Идеальная длительность временного порога зависит от скорости ТС и расстояния между соседними ТС. Предположим, средний грузовик с колесной базой 8 м со скоростью 20 м/с движется по дороге. Проезд мимо датчика займет 0,4 с для обеих осей. По дороге с более низкой предельной скоростью или во время пробок на дорогах у того же грузовика со скоростью 8 м/с это займет 1 с. Далее предположим, что автомобиль, идущий после грузовика с той же скоростью, применил трехсекундное правило [15, 16, 18]. Фиксированная величина временного порога в 1 с может быть незначительно изменена в обоих случаях, и даже может быть увеличена до 1,5 с для того, чтобы увеличить надежность.

Пересмотрим расстояние между двумя ТС: временной интервал в 3 с дает расстояние 60 м в первом сценарии и 24 м во втором. Это достаточно большие расстояния безопасности, и мож-



■ **Рис. 7.** Иллюстрация параметров алгоритма обнаружения ТС

но предположить, что они нарушаются довольно часто. Особенно при низкой скорости расстояние всего в несколько метров является обычным, и проблема становится очевидной. В то время как временной порог должен быть увеличен, когда скорость уменьшается, расстояние между ТС также снижается, что, с другой стороны, требует более короткого временного порога. Очевидно, что увеличивается либо вероятность ложного обнаружения, либо вероятность ошибки.

## Результаты

Авторами данной работы в мае 2011 г. в окрестностях города Лулео (Швеция) было обнаружено 138 из 140 ТС. Один из 140 автомобилей обнаружен не был и выявлено одно ложное обнаружение. На первый взгляд, можно было бы подумать, что алгоритм работает гораздо хуже, чем ожидалось. Тем не менее, размер выборки  $N=140$  дает очень низкий уровень доверия, и надежный процент ошибок не может быть рассчитан. Анализируя ошибку, можно сделать более разумный вывод.

Во-первых, амплитудный порог немного превышал значение энергии сигнала легкового автомобиля. Порог может быть снижен незначительно, но стоит отметить, что тогда повышается вероятность ложного обнаружения.

Во-вторых, после того как грузовик с прицепом прошел, еще несколько вибраций были зафиксированы. Причина такого рода ошибок неизвестна, но, скорее всего, связана с качеством дорожного покрытия и нелинейностью измерений.

Подход к решению этой проблемы заключается в использовании адаптивного временного порога [25] в зависимости от измеряемой энергии

и количества осей. Водители, как правило, держатся от грузовиков дальше безопасного расстояния, — это может быть правильным подходом. Другая возможность состоит в изменении решения, что автомобиль прошел только после того, как порог был превышен в течение определенного времени, по аналогии с алгоритмом, предложенным в работах [10, 16].

## Заключение

Оценка основных параметров ТС — обнаружение транспортных средств и подсчет количества осей ТС — с помощью измерения вибраций дорожного покрытия возможна. Обнаружение ТС можно обеспечить с большой надежностью. Представленный алгоритм показал хорошую производительность на экспериментальных данных. Особые случаи, а именно ошибки (ложное определение и промах), проанализированы, и предложены меры по преодолению проблемы.

Результаты подтверждают, что по второму алгоритму — оценки осей — можно определять параметры ТС с различным числом осей.

Кроме того, было показано, что с еще одним параметром — скоростью автомобиля — легко вычисляется колесная база ТС. По колесной базе можно делать полноценную идентификацию классов ТС, что является вопросом других исследований.

Данная статья имеет преемственность с тремя другими статьями авторов по этой тематике [26—28].

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы (соглашение № 14.В37.21.0406).

## Литература

1. National Highway Traffic Safety Administration. Counts for frontal air bag related fatalities and seriously injured persons. Jan. 2008. P. 1–15. <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/AB0108.pdf> (дата обращения: 10.08.2013).
2. National Highway Traffic Safety Administration. Fatality Analysis Reporting System Database. 2008. P. 5–17. <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/AB0108.pdf> (дата обращения: 10.08.2013).
3. Hegeman G., R. van der Horst, Brookhuis K. A., Hoogendoorn S. P. Functioning and acceptance of overtaking assistant design tested in driving simulator experiment // J. of the Transportation Research Board. 2007. Vol. 2018. P. 45–52.
4. Eidehall A., Pohl J., Gustafsson F., Ekmark J. Toward autonomous collision avoidance by steering // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Mar. 2007. Vol. 8. P. 84–94.
5. CAR 2 CAR Communication Consortium. Mission and objectives. Project Website. July 2009. P. 1–25. <http://www.car-to-car.org>. (дата обращения: 10.08.2013).
6. Robinson C. et al. Efficient message composition and coding for cooperative vehicular safety applications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. Nov. 2007. Vol. 56. P. 3244–3255.
7. Isaksson M. Vehicle detection using anisotropic magnetoresistors // Master's thesis. Chalmers University of Technology, 2008. P. 1–45.
8. Sullivan J. M., Winkler C. B., Hagan M. R. Smart barrel for an adaptive queue-warning system // Tech. Rep. University of Michigan. Febr. 2005. P. 15–52.

9. Misener J., Shladover S. PATH investigations in vehicle-roadside cooperation and safety: A foundation for safety and vehicle-infrastructure integration research // IEEE Intelligent Transportation Systems Conf. (ITSC'06). 2006. P. 9–16.
10. Coleri S., Cheung S. Y., Varaiya P. Sensor networks for monitoring traffic // 42th Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing. Aug. 2004. P. 1–7.
11. Birk W., Osipov E. On the design of cooperative road infrastructure systems // Reglermote. June 2008. P. 349–355.
12. Hostettler R., Birk W., Lundberg Nordenvaad M. Surface mounted vehicle property sensing for cooperative vehicle infrastructure systems // Proc. of the 16th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS), Scientific Session Final Papers, 2009. P. 1–8.
13. Birk W., Osipov E., Eliasson J. iRoad – cooperative road infrastructure systems for driver support // Proc. of the 16th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS), Scientific Session Final Papers, 2009. P. 51–55.
14. iRoad – A research project at Luleå University of Technology. <http://www.iroad.se>. (дата обращения: 10.08.2013).
15. Crispino M., D'Apuzzo. Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building // J. of Sound and Vibration. 2001. Vol. 246. N 2. P. 319–335.
16. Gramner K., Qvarnstrom R., Aberg T. iRoad – Project in Embedded Systems // Tech. Rep. Lulea University of Technology. 2009. P. 1–35.
17. Clemente P., Rinaldis D. Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1998. Vol. 17. N 5. P. 289–296.
18. Hostettler R. Traffic Counting Using Measurements of Road Surface Vibrations // Master's thesis. Lulea University of Technology, 2009. P. 1–48.
19. Cheung S. U., Varaiya P. Traffic Surveillance by Wireless Sensor Networks: Final Report // California PATH Research Report. 2007. P. 1–52.
20. Luz E., Mimbela Y., Klein L. A. A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems // Federal Highway Administration's (FHWA) Intelligent Transportation Systems Program Office. Aug. 2007. P. 1–25.
21. Lawrence A. Klein, Milton K. Mills, David R. P. Gibson. Traffic Detector Handbook. Third ed. // FHWA-HRT-06-108. Oct. 2006. Vol. I. P. 1–5.
22. Hostettler R., Birk W., Nordenvaad L. M. On the Feasibility of Road Vibrations-based Vehicle Property Sensing // Proc. of the World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS). 2010. P. 356–364.
23. Cheung S. U. et al. Traffic Measurement and Vehicle Classification with a Single Magnetic Sensor // PATH Report UCB-ITS-PWP-2004-07. 2004. P. 1–43.
24. Cheung S. U., Ergen S. C., Varaiya P. Traffic Surveillance with Wireless Magnetic Sensors // Proc. of the 12th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS). 2005. P. 1–13.
25. Hostettler R., Birk W. Analysis of the Adaptive Threshold Vehicle Detection Algorithm Applied to Traffic Vibrations // IFAC World Congress. 2011. P. 1–6.
26. Бардов В. М., Обертов Д. Е. Оценивание скорости транспортных средств с использованием магнитометра // Информационно-управляющие системы. 2013. № 4(65). С. 21–26.
27. Обертов Д. Е., Бардов В. М. Алгоритм идентификации классов транспортных средств с помощью акселерометров // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5(60). С. 15–18.
28. Обертов Д. Е. Спектральный анализ данных с акселерометров для задач обнаружения и идентификации транспортных средств // Научно-технический вестник ИТМО. 2012. № 6(8). С. 44–50.