

УДК 004.93 + 62.51 + 625.03

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ С АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ДЛЯ ЗАДАЧ  
ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

**Д.Е. Обертов**

Рассматриваются проблемы частотного и временного анализа вибраций дорожного покрытия, вызванных проезжающими транспортными средствами. Вибрации измеряются акселерометрами, устанавливаемыми на дорожную разметку. Реализуется предварительная обработка данных перед дальнейшим использованием их для анализа параметров движения транспортного потока. Приведены результаты обработки данных с помощью спектрального анализа и фильтрации.

**Ключевые слова:** акселерометр, обнаружение транспортных средств, идентификация классов транспортных средств, интеллектуальные транспортные системы, спектры, спектральная обработка, спектральный диапазон, быстрое преобразование Фурье, короткооконное преобразование Фурье.

**Введение**

В последнее время большое внимание уделяется проектированию и разработке интеллектуальных транспортных систем, в том числе интеллектуальных дорог, которые снабжены средствами, позволяющими обеспечивать взаимодействие и связь между транспортной инфраструктурой и транспортными средствами

(ТС) [1–5]. Идентификация классов ТС является важным компонентом безопасности дорожного движения. В связи с этим создание системы и алгоритма, который с большой производительностью и надежностью мог бы работать в различных погодных условиях, в любое время суток, является актуальной проблемой. Необходимо, по возможности, обеспечить бесконтактность измерений, что позволит продлить время эксплуатации системы, уменьшить количество переустановок оборудования и вмешательство людей в дорожное движение, приводящее к нарушению движения транспорта во время установки.

ТС могут быть классифицированы по различным критериям в зависимости от задач. Наиболее очевидным является применение идентификации классов ТС для мониторинга и статистики дорожного движения [5, 6]. Эта информация может быть использована в дальнейшем для планирования ремонта дорог, организации других эксплуатационных мероприятий и принятия мер по разгрузке транспортной сети. В настоящей работе исследуется возможность использования акселерометров для обнаружения и идентификации классов ТС. Для предварительной обработки сигнала предлагается применить спектральный и временной анализ данных с акселерометров, встроенных в полотно дороги. Характеристики используемого акселерометра представлены в [7]. Представленные в данной работе материалы частотного и временного анализа данных с акселерометров являются развитием работ, изложенных в [8].

### Методика эксперимента

Исходные данные получены автором в университете г. Лулеа (Швеция, Lulea Technical University) с февраля по май 2011 г. в рамках проекта iRoad совместно с Wolfgang Birk (координатор проекта), Roland Hostettler, а также Владимиром Бардовым. Эксперименты проводились на дороге вблизи г. Лулеа, имеющей 4 полосы движения (по две в каждом направлении), движение регулярное. Разрешенная максимальная скорость 110 км/ч. Условия эксперимента: зимний день, температура воздуха  $-5^{\circ}\text{C}$ . На дороге не было гололеда. Сенсорный узел был установлен на дорожной разметке и состоял из акселерометра (частота дискретизации 22000 Гц) и магнитометра (частота дискретизации 200 Гц). Данные предварительно усиливались с помощью усилителя У (рис. 1), затем передавались на компьютер с помощью USB-кабеля, записывались с помощью специальной программы и обрабатывались в пакете MATLAB.

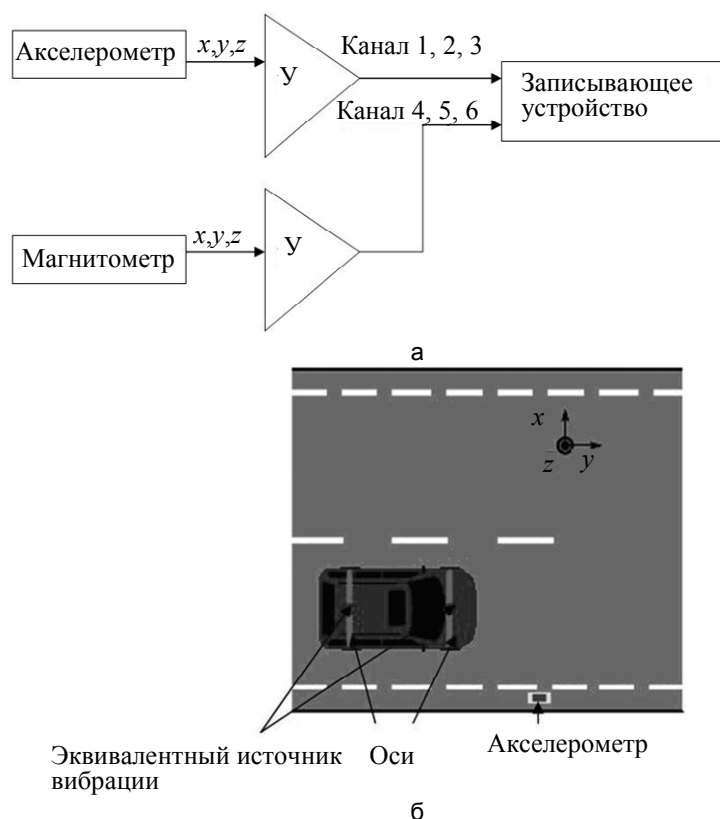


Рис. 1. Схема регистрации: функциональная схема измерительного блока (а); схема расположения датчика и система координат (б)

Следует отметить, что система предполагает проведение измерений дистанционно, с использованием модуля Wi-Fi, что делает их достаточно мобильными и привлекательными для потенциальных пользователей. На рис. 1 показана функциональная схема измерительной установки (рис. 1, а) и схема расположения сенсорного узла (рис. 1, б), а на рис. 2 – фотография сенсорного узла. В эксперименте сен-

сornyй узел крепился к дорожной разметке с помощью клейкого материала. При успешной реализации проекта предусмотрена установка этого узла в специальных отверстиях в местах дорожной разметки.



Рис. 2. Сенсорный узел измерительной установки

### Временной анализ

Во временной области проанализированы форма сигнала, его продолжительность и уровень. Сигнал представлен в виде временных рядов, которые дают некоторую первичную информацию [4–6], такую, к примеру, как повышенная сейсмическая активность.

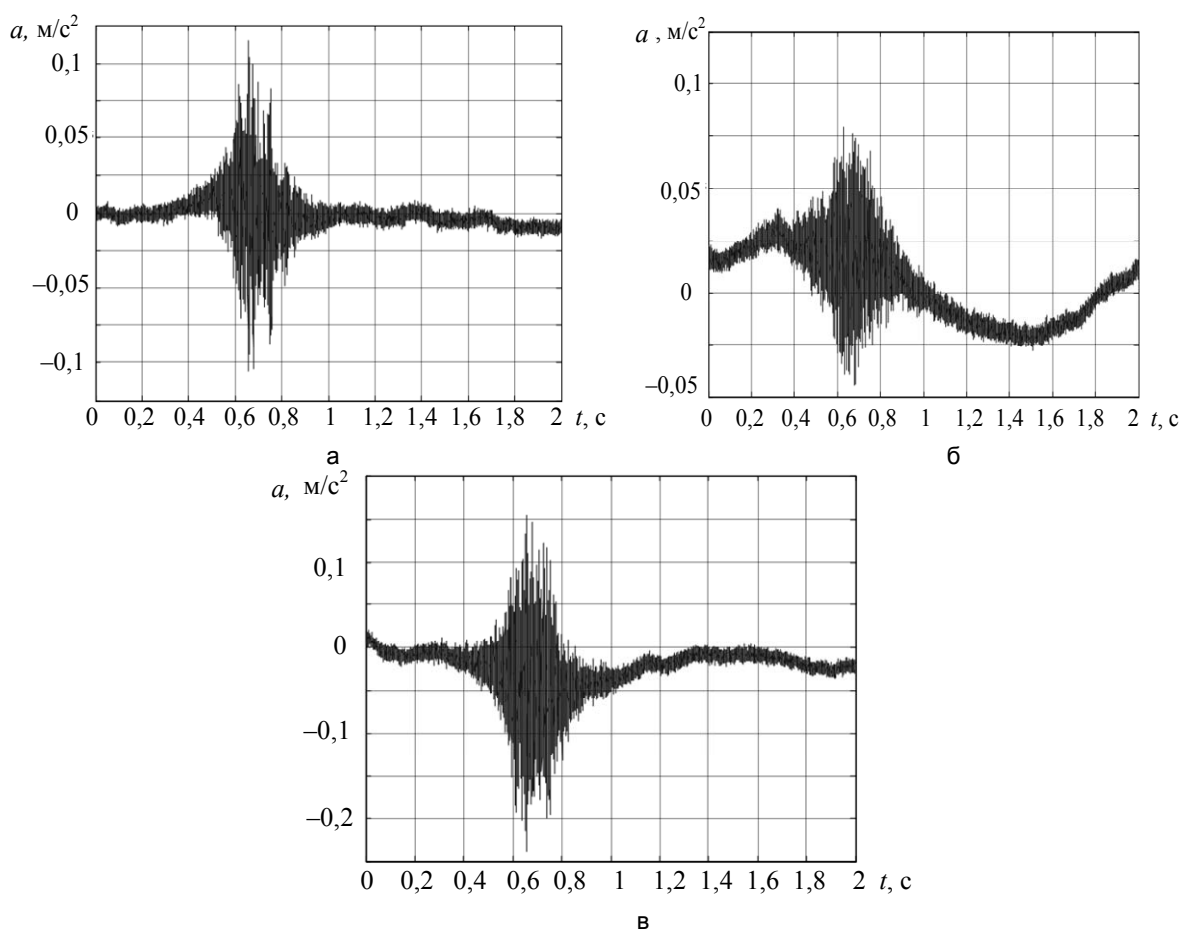


Рис. 3. Вибрации дороги в трех перпендикулярных направлениях: (а –  $Ox$ ; б –  $Oy$ ; в –  $Oz$ ). Легковой автомобиль, скорость  $V=22$  м/с

Рассмотрим компоненты вибрации по трем осям  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  для легкового автомобиля (рис. 3). Ось  $Oy$  направлена вдоль полотна в направлении движения, ось  $Ox$  – вдоль полотна перпендикулярно движению, и ось  $Oz$  – перпендикулярно полотну дороги. Сейсмические волны, вызванные любой формой возбуждения, распространяются как объемные ( $P$ - и  $S$ -волны) и поверхностные (волны Лява и Рэлея). В за-

висимости от способа распространения волны имеют различную степень затухания. Поверхностные волны испытывают ослабление  $1/\sqrt{r}$  в однородной среде, где  $r$  – расстояние от источника волны до рассматриваемой точки. Объемные волны ослабляются пропорционально  $1/r$  в однородной среде [4].  $P$ -волны и волны Лява являются основной причиной горизонтальных вибраций в  $x$ - и  $y$ -направлениях. Волны Рэлея являются главной причиной вертикальных вибраций в  $z$ -направлении. Кроме того, в [4–6] было показано, что колебания в близких к поверхности слоях несут около  $2/3$  энергии в поверхностной волне, и только  $1/3$  распространяется в виде объемных волн.

Такая же закономерность сохраняется и для других типов ТС. В частности, авторами получены подобные сигналы и для грузового транспорта. По этой причине дальнейший спектральный анализ был ограничен осью  $Oz$ .

### Спектральный анализ

При частотном анализе были применены быстрое преобразование Фурье (БПФ) и короткооконное преобразование Фурье (КОПФ).

На рис. 4, а, представлен результат БПФ сигнала, полученного от легкового автомобиля, движущегося со скоростью 22 м/с; на рис. 4, б – сигнала от грузовика с прицепом, движущегося со скоростью 25 м/с. На рис. 5 показаны результаты КОПФ для тех же сигналов. Затемненные области на рис. 5 соответствуют наибольшим амплитудам сигнала (более высокоэнергетическим компонентам). На рис. 6 для наглядности показаны в трехмерном виде совмещенные изображения двух видов преобразования.

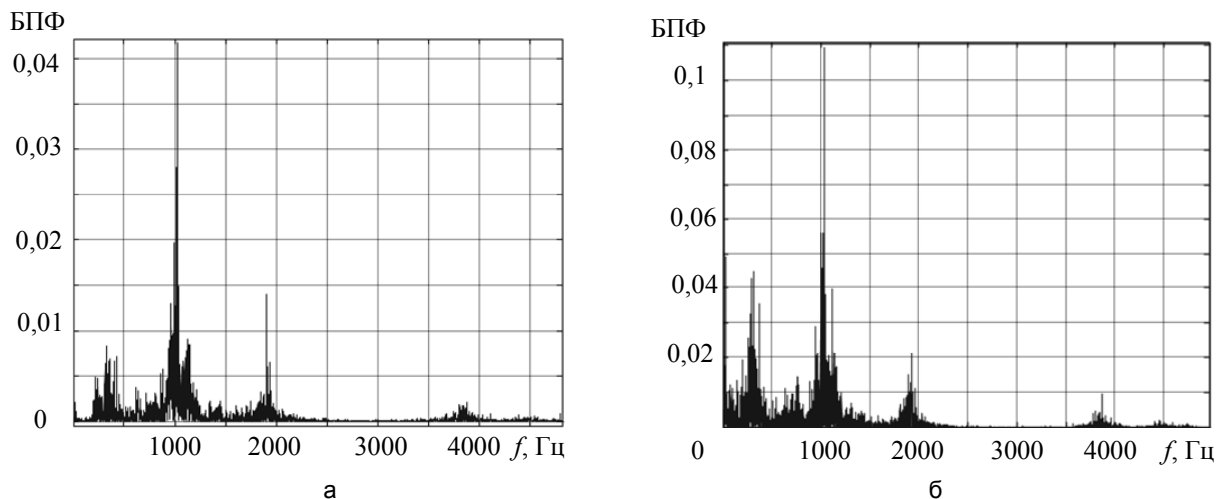


Рис. 4. Результат БПФ для сигнала от легкового автомобиля  $V=22$  м/с (а) и грузовика с прицепом  $V=25$  м/с (б)

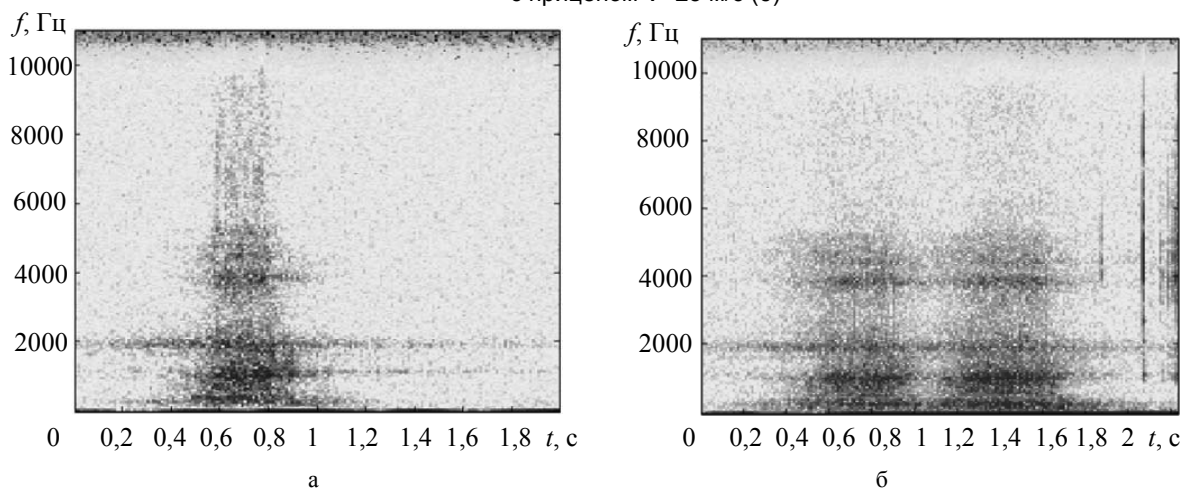


Рис. 5. Результат КОПФ для сигнала от легкового автомобиля  $V=22$  м/с (а) и грузовика с прицепом  $V=25$  м/с (б)

Частотные характеристики сигналов, полученных от разных видов транспорта, имеют схожие компоненты. В общем случае можно выделить две характерные полосы частот: до 1750 Гц и от 2 кГц до 3 кГц. Отчетливо видно, что наиболее информативной является полоса частот от 850 Гц до 1750 Гц. Однако сигнал вибрации, вызванной проездом грузовика, содержит высокоэнергетические компоненты на

более высоких частотах, от 3,5 кГц до 4 кГц. Это свойство сигнала может быть использовано для идентификации транспортных средств.

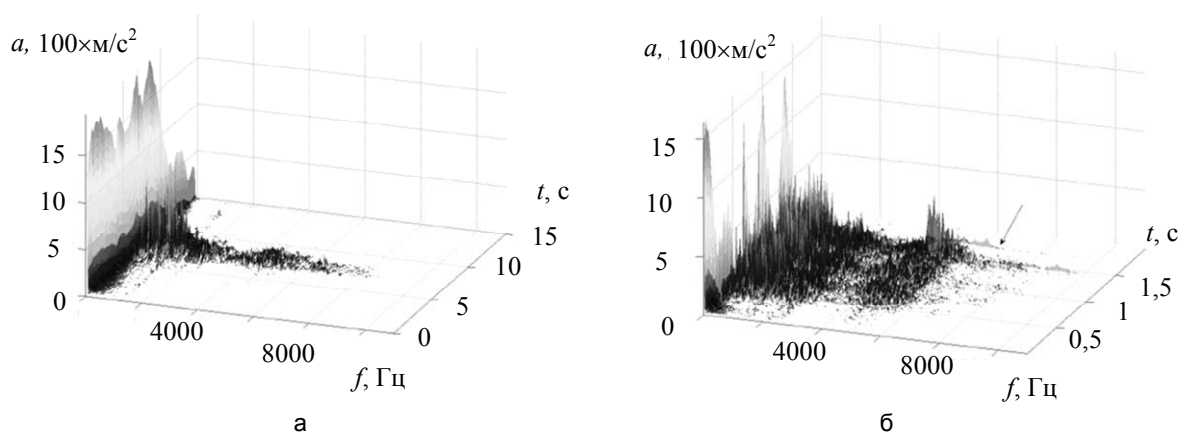


Рис. 6. Совмещение короткооконного и быстрого преобразований Фурье: легковая машина  $V=22$  м/с (а); грузовик с прицепом  $V=25$  м/с (б)

Вместе с тем анализ спектральных характеристик (рис. 4–6) показывает, что максимум энергии сигнала приходится на частотный диапазон 850–1750 Гц. Однако он содержит значительное число как высокочастотных, так и низкочастотных помех, вызванных присутствием на дороге посторонних источников шумов, к примеру, связанных с проведением ремонтных работ. Дальнейшая обработка сигнала целесообразна после отфильтровывания сигналов помех полосовым фильтром. В этой работе авторами был предложен эллиптический фильтр, обеспечивающий максимальное затухание в полосе задерживания по сравнению с другими фильтрами [9].

#### Фильтрация с применением эллиптического полосового фильтра

Как отмечено выше, предварительная обработка сигнала с помощью полосового фильтра позволяет снизить уровень шума и помех для более качественной обработки сигнала. Исходя из полученных ранее результатов спектрального анализа, предложены следующие параметры полосового фильтра:

- нижняя частота среза  $f_l=850$  Гц;
- верхняя частота среза  $f_u=1750$  Гц;
- максимальная пульсация полосы пропускания  $R_p=1$  дБ;
- минимальное ослабление в полосе задерживания  $R_s=50$  дБ.

Расчетные логарифмическая амплитудно-частотная (ЛАЧХ) и фазо-частотная (ЛФЧХ) характеристики такого фильтра показаны на рис. 7. Вид исходного сигнала (рис. 6) после фильтрации показан на рис. 8.

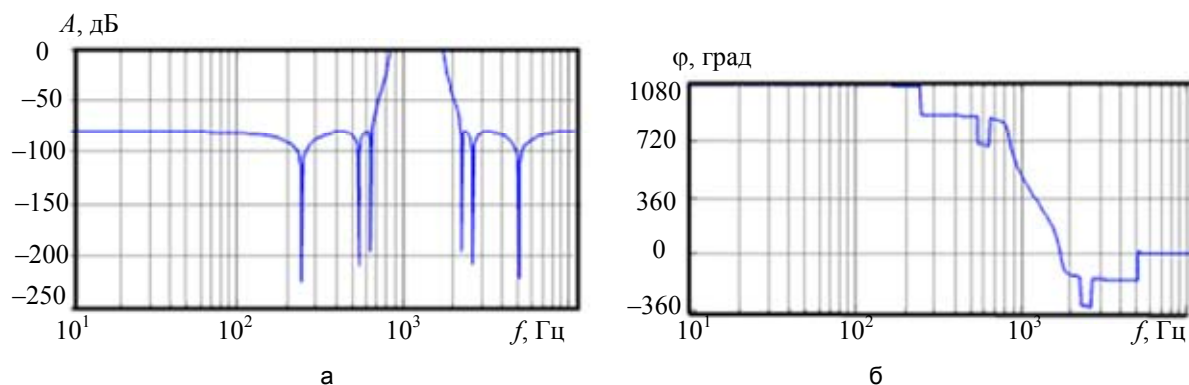


Рис. 7. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) полосового фильтра

Последующая обработка сигнала от движущихся транспортных средств включает устранение отрицательных значений путем возведения в квадрат, сглаживание с помощью скользящего окна или фильтра нижних частот и нахождение амплитудного порога для обнаружения транспортного средства и временного порога, позволяющего разделять транспортные средства, движущиеся в сравнительной близости. Последовательность обработки сигнала, полученного от движущегося легкового автомобиля (рис. 3, в), и его форма на различных этапах обработки представлены на рис. 8 (а–г). Отметим, что данным методом можно определять скорости транспортных средства с использованием двух акселерометров.

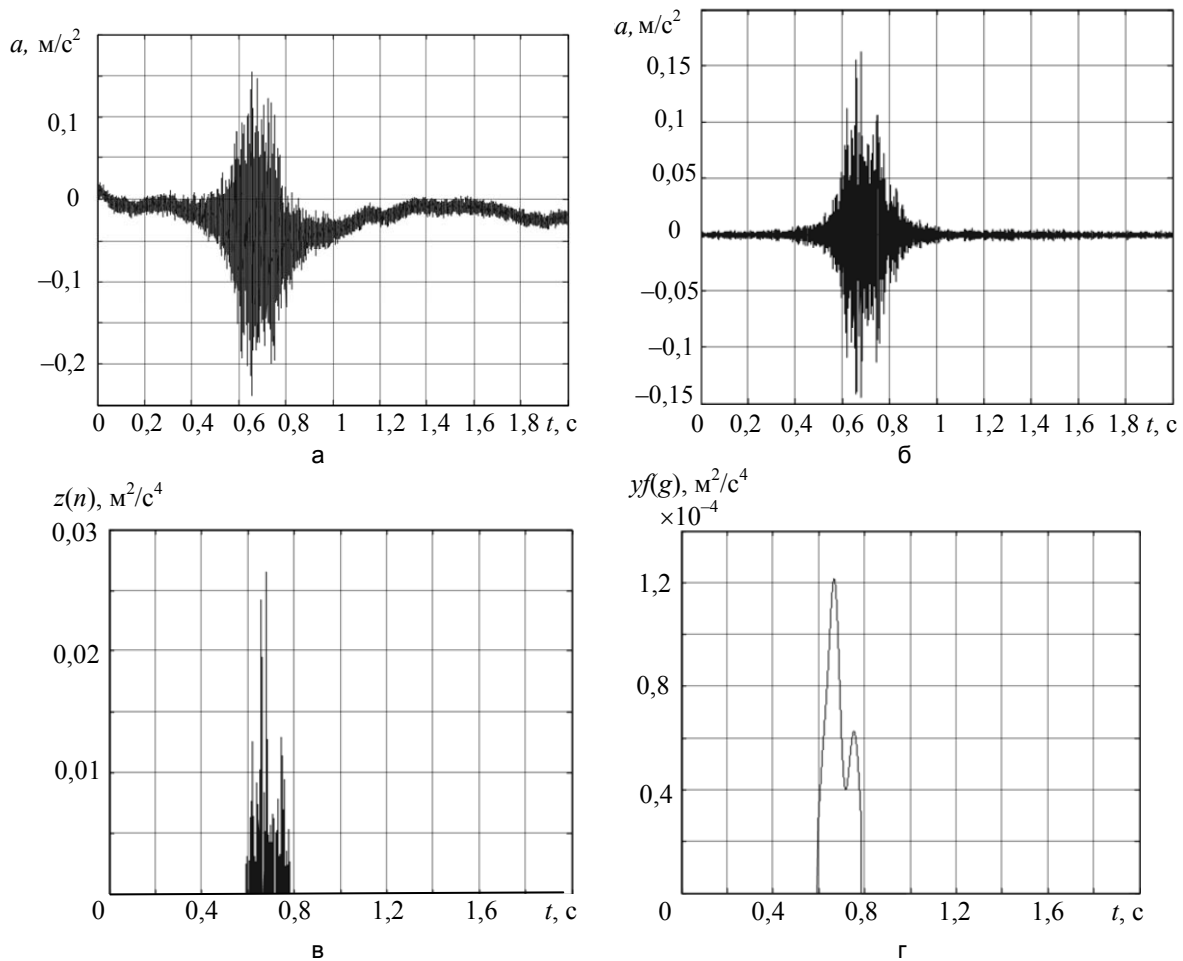


Рис. 8. Сигнал датчика на разных этапах обработки: исходный сигнал с акселерометра (а); сигнал после полосового фильтра (рис. 7) (б); сигнал после возведения в квадрат и сравнения с пороговым значением (в); сигнал  $yf(g)$  после сглаживания скользящим окном, фильтром низких частот и удалением помех (г)

### Заключение

Полученные результаты могут быть применены в реальных устройствах организации дорожного движения для построения интеллектуальных систем с целью обнаружения транспортных средств, идентификации их классов, подсчета количества ТС и мониторинга их скорости.

Концепция разрабатываемой системы состоит в следующем. Формируется сеть сенсорных узлов, установленных на дорожной разметке на расстоянии 50 м друг от друга. Датчики крепятся к дорожному покрытию в районе дорожной разметки с помощью специального клея или монтируются в дорожное покрытие. Возможно их питание от солнечных батарей. Они обмениваются информацией между собой и серверами за пределами дороги.

Датчик может менять цвет или подавать иные световые сигналы (к примеру, мигать) за несколько сотен метров до начала полосы гололеда или какой-то другой критической ситуации. Датчики могут передавать сигнал ближайшему дорожному знаку, который также подает предупреждающие сигналы о необходимости уменьшить скорость, сменить полосу движения и т.д. Иначе говоря, сенсоры передают всю полезную информацию транспортной инфраструктуре, которая затем использует ее для обеспечения безопасности и повышения качества дорожного движения. В данный момент для тестирования развернута сеть из 400 датчиков, которые выполняют вышеуказанные функции. Таким образом, реализуется концепция «умных дорог».

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (соглашение № 14.В37.21.0659).

### Литература

1. Birk W., Osipov E., Eliasson J., iRoad - cooperative road infrastructure systems for driver support // 16th ITS World Congress. – Stockholm, Sweden, 21–25 September 2009. – P. 1–8.
2. Birk W., Osipov E. On the design of cooperative road infrastructure systems // Reglermote 2008. – June 2008. – P. 349–355.

3. Birk W., Eliasson J., Lindgren P., Osipov E., Riliskis L. Road Surface Networks Technology Enablers for Enhanced ITS // 2nd IEEE Vehicular Networking Conf., VNC 2010. – Jersey City, NJ, 2010. – 13–15 Dec. – P. 152–159.
4. Hostettler R., Birk W., Lundberg Nordenvaad M. Surface mounted vehicle property sensing for cooperative vehicle infrastructure systems // Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference. – Barcelona, Spain, 26–29 April 2009. – P. 1–5.
5. Hostettler R. Traffic Counting Using Measurements of Road Surface Vibrations // Master's thesis. – Lulea University of Technology, 2009. – P. 1–48.
6. Hostettler R., Birk W., Nordenvaad L.M. On the Feasibility of Road Vibrations-based Vehicle Property Sensing // IET Intelligent Transport Systems. – 2010. – V. 4. – № 4. – P. 356–364.
7. Datasheet Model 832 accelerometer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.meas-spec.com/product/t\\_product.aspx?id=5593](http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=5593), свободный. Яз. англ. (дата обращения 10.03.2011).
8. Обертов Д.Е., Бардов В.М. Алгоритм идентификации классов транспортных средств с помощью акселерометров // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 5 (60). – С. 15–18.
9. Лем Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 592 с.

**Обертов Дмитрий Евгеньевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [dimondking@mail.ru](mailto:dimondking@mail.ru)