# Матэматыка

УДК 004.93

# Система сбора статистики автомагистралей

**Е.В. Ермашкевич, Е.А. Краснобаев**
*Учреждение образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова»*

*Сегодня в связи с всевозрастающей скоростью износа дорог встает задача контроля этого параметра, для чего придумываются различные системы, одной из них является система сбора статистики проезжающих автомобилей, чему и посвящено исследование.*

*Цель статьи – разработать систему классификации транспортных средств по сейсмическим сигналам.*

***Материал и методы.*** *Методологической основой исследования стали научные труды зарубежных ученых в указанной предметной области. Основные методы: математического моделирования и радиоэлектронного проектирования. При этом для создания акустической решетки в виде печатной платы применялись 48 МЭС микрофонов, 7 акселерометров-магнетометров, для обработки сигналов использовалась ПЛИС «Циклон 4».*

***Результаты и их обсуждение.*** *Построена перспективная система сбора статистики, проведено испытание ее отдельных частей и сравнение с аналогами, в результате устройство способно распознавать три типа (класса) объектов: легковой автомобиль, грузовой автомобиль, трактор по характерным частотным спектрам, максимальная дальность четкого обнаружения целей системой составила 50 метров, за ее пределами происходят ошибки распознавания.*

***Заключение.*** *На основе полученных результатов разработана перспективная система сбора статистики автомагистралей, основанная на использовании гибридной решетки акселерометров, магнетометров и микрофонов.*

***Ключевые слова:*** *петлевые детекторы, индукционная петля, МЭС, ПИМ, АЦП, ПЛИС, компонент смешанных гауссовых моделей, БПФ, классификаторы аудиосигналов.*

# The system of Collecting Statistics of Highways

**E.V. Ermashkevich, E.A. Krasnobayev**
*Educational Establishment «Vitebsk State P.M. Masherov University»*

*Today, due to ever-increasing rate of deterioration of roads we face the task of monitoring this parameter, which leads to inventing various systems; one of them is a system for collecting statistics of passing vehicles, to which the research is devoted.*

*The aim is to develop a system for classification of vehicles according to seismic signals.*

***Material and methods.*** *The methodological basis of the study was scientific works of foreign scholars in the subject area. The main methods used in the work are the methods of mathematical modeling, and electronic design. The work to create the acoustic lattice in the form of printed circuit board 48 microphones, 7 accelerometers, magnetometers were used, for signal processing FPGA «Cyclone 4» was used.*

***Findings and their discussion.*** *We have done the following: a promising system for collecting statistics was built, its individual parts test was conducted, and the comparison with the analogues was made, resulting in the ability of the device of recognizing three classes of objects: car, truck, tractor according to the characteristic frequency spectra; the maximum range of clear detection of the targets by the system is 50 meters; beyond it recognition errors occur.*

***Conclusion.*** *Based on these results, the promising system for collecting statistics of highways, based on the use of hybrid lattice accelerometers, magnetometers and microphones was elaborated.*

***Key words:*** *loop detectors, induction loop, MEMS, PDM, ADC, FPGA, component of mixed Gaussian models, FFT, audio signals classifiers.*

Сегодня в связи с всевозрастающей скоростью износа дорог встает задача контроля этого параметра, для чего придумываются различные системы, одной из них является система сбора статистики проезжающих автомобилей, о которой и пойдет речь в данной работе.

Как известно, для сбора статистики использования дорог применяются два основных типа датчиков: индуктивные петлевые датчики и системы видеомониторинга.

Петлевые детекторы используются для обнаружения транспортных средств, которые попадают в зону действия индукционной петли. Проволочная петля, размещенная под землей, представляет высокочастотный колебательный контур. Когда транспортное средство с металличе-

Репозиторий ВГУ

скими узлами приближается к проволочной петле или останавливается в ее границах, в контуре происходит изменение частоты колебаний, их погрешность обнаружения транспортных средств составляет порядка 1%.

Системы видеомониторинга работают на основе визуального распознавания транспортного средства различными видами камер, их погрешность обнаружения транспортных средств составляет порядка 3%.

Все вышеописанные системы имеют существенные недостатки: они не могут использоваться без износа осадками и самими транспортными средствами, имеют крайне высокую стоимость как самого оборудования, так и его установки. Поэтому нами было принято решение создать новую систему сбора статистики автомагистралей с помощью сейсмических датчиков, лишенную этих недостатков.

Для ее создания следовало решить 2 задачи: построить электронную акустическую (сейсмическую) решетку и классификатор для нее.

Цель статьи – разработать систему классификации транспортных средств по сейсмическим сигналам.

**Материал и методы.** Методологической основой исследования стали научные труды зарубежных ученых в указанной предметной области [1–5]. Основные методы: математического моделирования и радиоэлектронного проектирования. При этом для создания акустической решетки в виде печатной платы применялись 48 МЭС микрофонов, 7 акселерометров-магнетометров, для обработки сигналов использовалась ПЛИС «Циклон 4».

**Результаты и их обсуждение.** ***Создание сейсмической фазированной решетки.*** Фазированные микрофонные решетки нашли широкое применение в устройствах обработки акустических сигналов с целью увеличения соотношения сигнал/шум в заданном направлении. Например, в сотовом телефоне простейшая микрофонная решетка состоит всего из двух микрофонов и служит для увеличения соотношения сигнал/шум говорящего.

Более сложные фазированные микрофонные решетки обычно состоят из 4-х и более микрофонов. Их число может достигать 64 и даже 512 штук. Главное назначение фазированной микрофонной решетки – создать нужную диаграмму направленности в заданном направлении, оперативно менять это направление в пространстве и тем самым увеличить соотношение сигнал/шум от выбранного акустического источника, на который направлена фазированная антенная решетка.

В данной работе используется технология построения фазированных микрофонных решеток на микроэлектромеханических системах МЭС с выходом в виде плотностно-импульсной модуляции ПИМ. В отличие от аналоговых микрофонов МЭС ПИМ имеют встроенный усилитель, АЦП и ПИМ модулятор. Первоначально ПИМ имели высокий уровень шумов и низкую чувствительность, но технология совершенствовалась и в 2012–2013 гг. появились МЭС ПИМ микрофоны с параметрами, подходящими для создания плоских микрофонных решеток.

ПИМ модулятор позволяет существенно экономить число соединений в связи с тем, что передает всего лишь 1-битный сигнал, но с частотой дискретизации в 64 раза большей, чем частота дискретизации обычного АЦП. Например, для дискретизации 16-битного сигнала с частотой дискретизации 44.1 кГц требуется частота дискретизации в однобитном режиме 2822,4 кГц. Положительное изменение амплитуды представляется всеми единицами, отрицательное – всеми нулями. Нулевая точка представлена сменой двоичного числа, т.к. значение амплитуды аналогового сигнала в каждый момент представлено в виде плотности импульсов, данный вид модуляции и называют плотностно-импульсной модуляцией.

Использование ПИМ уменьшает шумы квантования в звуковом диапазоне частот, перенося их за его пределы, эта технология получила название «технология формирования шума» (англ. noiseshaping). Плюс ПИМ еще и в том, что для демодуляции сигнала необходим обычный фильтр нижних частот. Таким образом, решается одновременно две задачи:

1. Восстановить импульсно-кодовый модулированный ИКМ 16-битный сигнал с помощью каскадов гребенчатых фильтров и интеграторов КГИ с фильтром-корректором.

2. Становится возможным передача ПИМ сигнала на выходе ПЛИС на аналоговый НЧ фильтр для минимизации выходных компонентов.

Для коррекции ПИМ модулированного сигнала необходимо использовать лишь одну линию задержки, что значительно упрощает корректор фазы внутри ПЛИС и позволяет отказаться от аналоговой коррекции фазы вовсе.

Таким образом, при применении микрофонов с ПИМ выходом в размер блока аналого-цифровой обработки на 16 каналов помещается аналогичный блок на 70 каналов.

В итоге имеем ряд преимуществ микрофонных решеток на МЭС ПИМ микрофонах:

Репозиторий БГУ

1) малый размер блока аналого-цифровой обработки;

2) всего 1 вывод ПЛИС на 1 микрофон;

3) отсутствие внешних аналоговых элементов;

4) одна ПЛИС на одну микрофонную решетку;

5) малое энергопотребление;

6) уменьшение влияния помех на информационные линии благодаря передаче сигнала в цифровой форме;

7) легкость коррекции фазы отдельных микрофонов;

8) возможность создания однолучевых и многолучевых диаграмм направленности различной формы;

9) слежение за множеством объектов и выделение из множества единичного объекта;

10) возможность адаптивного изменения диаграммы направленности в режиме реального времени.

Нами была разработана акустико-акселерометрическая решетка, она имеет обзор 360° и представляет собой вытянутый шестигранник, на боковых гранях которого закреплены по 8 МЭС микрофонов на каждой боковой грани, каждая боковая грань является минимикрофонной решеткой и охватывает угол обзора 180° по азимуту и 90° по углу места.

На верхнем основании шестигранника установлена плоская акселерометрическая решетка, она состоит из 7 акселерометров-магнетометров, расположенных в центре и по углам правильного шестиугольника.

Одновременное использование микрофонов и акселерометров-магнетометров, как мы изначально предполагали, позволит значительно улучшить точность определения классов объектов, детектируемых системой. Также была разработана плата цифровой обработки сигнала для нашей системы: она обрабатывает сигналы с 48 микрофонов и 7 акселерометров-магнетометров, имеет интерфейсы оптической передачи данных и USB 3.0. Ее сердцем является ПЛИС «Циклон 4», которая отвечает непосредственно за прием, демодуляцию и обработку сигналов, поступающих с микрофонной и акселерометрической решеток, обработанные сигналы поступают на оптический и USB выходы системы.

***Проблема классификации акустических сигналов, основные типы классификаторов.*** Классификаторы звуковых сигналов делятся на два больших класса:

1) классификаторы, основанные на поиске сигнала по его значению (смыслу);

2) классификаторы, основанные на подобии сигнала.

Первые используются во многих исследованиях, связанных с аудиопоиском, они включают такие методы, как аудиоклассификация, распознавание речи и музыкальная транскрипция.

Классификаторы второго типа, напротив, стремятся достичь поиска, основанного на подобии, или, иначе говоря, более определенной «идентификации отпечатка звука», которая представляет собой поиск из немаркированных аудиоархивов, базируемых только на мере подобия эталонного сигнала исследуемому (далее мы будем использовать именно эти методы).

Наша цель – соответствие сигнала, а не ассоциация сигналов с их семантикой. Хотя диапазон признаков у основанного на подобии поиска может показаться узким по сравнению с основанными на содержании подходами, при решении нашей задачи этого достаточно. Дополнительным плюсом выбранного нами типа классификаторов является то, что данный тип классификаторов может использоваться для обнаружения и статистического анализа музыки, радиопередач, поиска так называемых «коммерческих отпечатков», а также для идентификации содержания. Он позволяет обнаружить факт копирования защищенных авторским правом произведений.

В приложениях снятия «аудиоотпечатков» начальный и сохраненные сигналы не являются точными копиями друг друга даже в одинаковых моментах одного и того же самого звука вследствие, например, сжатия либо различных уровней шумов эталонного и анализируемого сигнала.

В то же время для реально применимых приложений необходимо, чтобы «звуковые отпечатки» были компактными и анализ особенностей в них являлся в вычислительном отношении эффективным. С этой целью были развиты несколько методов выделения признаков, с помощью которых можно достичь поставленных целей минимальными средствами. Рассмотрим один из них подробнее.

***Метод Time-series Active Search.*** Работа этого метода основана на следующем: векторные последовательности изначально извлечены из характерного звука, а после извлекаются из аудиопотока. При этом используются окна той же длины, что и у характерного звука и потока, вырываемого из аудио (рис. 1).

Векторы особенности используются в пределах окна для того, чтобы использовать при оценке общий компонент смешанных гауссовых моделей «CCGMM».

Репозиторий ВГУ

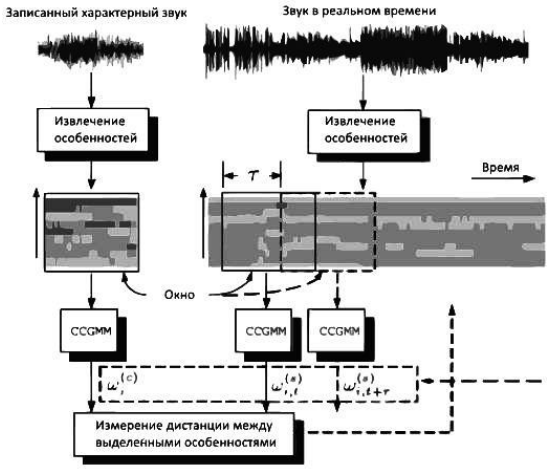


Рис. 1. **Описание алгоритма TAS.**

Далее вычисляется расстояние между двумя оцененными CCGMMs, соответственно, от характерного звука и окошка из аудиопотока. Если расстояние ниже порога, характерный звук, как полагают, обнаружен в аудиопотоке. Далее окно на аудиопотоке перемещается вперед на время окна, и поиск начинается сначала. В этом подходе любой аудиосегмент представляется смешанной гауссовой моделью (GMM) как его компактный отпечаток. Вектор особенности *x*, извлеченный из аудиосегмента *k*, представлен GMM, которая состоит из M гауссовских компонентов с весами $w_i^{(k)}$, средними $\mu_i^{(k)}$ и дисперсиями $\Sigma_i^{(k)}$, где *i=1, 2..M.*

$$p^{(k)}(x)=\sum_{i=1}^{M} w_i^{(k)} N\left(x \mid \mu_i^{(k)}, \Sigma_i^{(k)}\right). \qquad (1)$$

Для вычисления расстояния мы используем единую GMM для всех GMMs аудиосегментов:

$$p^{(u)}(x)=\sum_{i=1}^{M} w_i^{(k)} N\left(x \mid \mu_i^{(u)}, \Sigma_i^{(u)}\right). \qquad (2)$$

Обозначим T число векторов особенностей $x_t$, $t=1..T$ для аудиофрагмента *k*. Тогда мы можем вычислить веса $w_i^{(k)}$ согласно формуле:

$$w_i^{(k)}=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{M}\frac{w_i^{(u)} N\left(x \mid \mu_i^{(u)}, \Sigma_i^{(u)}\right)}{\sum_{j=1}^{M} w_j^{(k)} N\left(x \mid \mu_j^{(u)}, \Sigma_j^{(u)}\right)}. \qquad (3)$$

Поскольку окно сдвигается с изменениями аудиопотока вперед во времени, расстояния имеют определенную непрерывность от текущего временного шага к следующему. Это позволяет использовать простую формулу оценки расстояния между GMM сегмента и GMM характерной особенности.

$$d_{KL}(t)=\sum_{i=1}^{M}\left(w_{i,t}^{(S)}-w_i^{(C)}\right)\log\frac{w_{i,t}^{(S)}}{w_i^{(C)}}. \qquad (4)$$

Соответственно, если $d_{KL}(t) < порога$, считаем, что особенность присутствует в сигнале.

***Собственный классификатор, используемый в работе.*** В данном исследовании мы используем упрощенный метод TAS применительно к спектрально-гистограммным характеристикам сигнала.

Рассмотрим алгоритм разработанного классификатора на 2-х основных этапах: при обучении и работе в реальном мире. В процессе обучения с помощью быстрого преобразования Фурье БПФ строились спектральные характеристики характерного сигнала, время записи сигнала составляло 1 с, далее производилось сложение спектров за данное время, в результате формировались спектральные гистограммы. Этот процесс был проведен 50 раз за 50 с. Мы получали 50 гистограмм, далее производилось поэлементное усреднение полученных гистограмм и таким образом строилась за 1 с «эталонная» гистограмма, которая анализировалась и далее использовалась для классификации объектов, для ускорения поиска в ней выделялись характерные области, позволявшие сократить вычислительные затраты на классификацию целей, что в совокупности дало значительное уменьшение размерности эталонных гистограмм. Схему работы классификатора можно увидеть на рис. 2.

В итоге нами была построена сейсмическая решетка, проведены испытание ее отдельных частей и сравнение данной решетки с отдельным аналоговым акселерометром. Устройство способно распознавать три типа (класса) объектов: легковой автомобиль, грузовой автомобиль, трактор по характерным частотным спектрам.

Репозиторий ВГУ

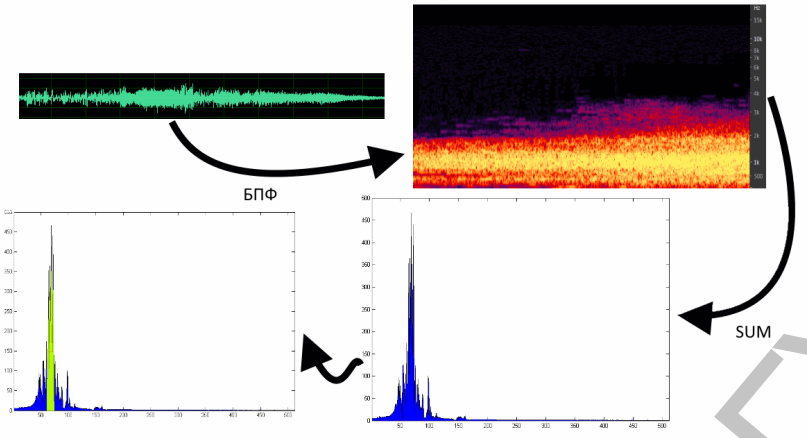


Рис. 2. **Описание собственного классификатора целей.**

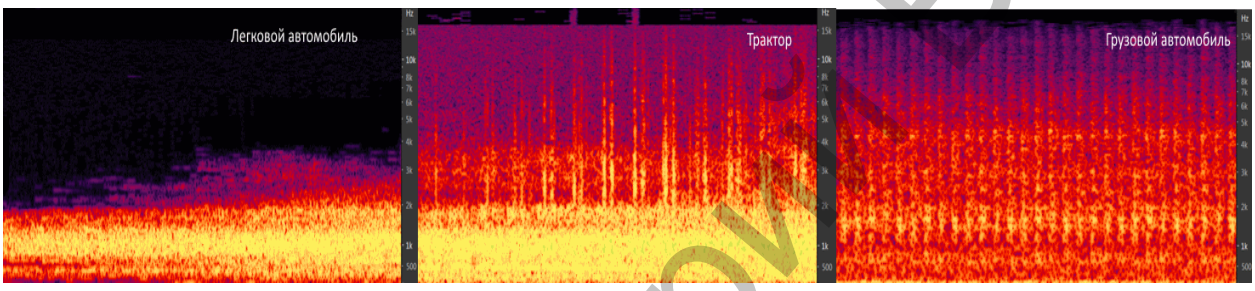


Рис. 3. **Спектрограммы различных объектов.**

Рассмотрим алгоритм работы устройства:

1) при включении устройства происходит измерение уровня шумов окружающей обстановки;

2) записывается текущее значение шума;

3) если уровень входного сигнала выше уровня шума на 5 дБ, включается записывающее устройство; также фиксируется точное время события;

4) устройство записывает входной сигнал продолжительностью в 1 с;

5) первоначальный сигнал преобразуется в сетку спектров, которые далее суммируются в гистограммы;

6) подобие гистограмм анализируется с помощью разработанного алгоритма, и в случае если расстояние между двумя гистограммами меньше определенного порога, делается вывод о принадлежности цели к определенному классу; если расстояние больше всех существующих порогов, устройство делает вывод о том, что данный объект не принадлежит не к одному из классов.

Устройство может быть доработано путем установки приемопередатчика для связи с другим устройством поблизости и определения точного положения целей.

Как видно из приведенных выше спектрограмм (рис. 3), спектр легкового автомобиля «гладкий» и является четко отслеживаемым. Характерный спектр трактора легко различим по своим областям характерного максимума (2–4 кГц). Спектр тяжелого грузового автомобиля узнаваем благодаря очень широкой спектральной полосе и максимуму в области (1–2 кГц). Следует обратить внимание на весьма характерное время между спектральными составляющими грузового автомобиля и трактора, для трактора оно составляет порядка 0,1 с, для грузового автомобиля почти в 3 раза меньше, причем у трактора весьма характерный отпечаток. Что интересно, временное расстояние между соседними спектральными составляющими в области скоростей (20–60 км/ч) остается практически неизменным. Нами была проведена оценка дальности обнаружения целей системой. В результате проверки выяснилось то, что спектральные характеристики сигнала слабо зависят от расстояния до объекта (в разумных пределах), меняется лишь их уровень, максимальная дальность четкого обнаружения целей системой составила 50 метров, за ее пределами происходят ошибки распознавания.

**Заключение.** Таким образом, выполнено изучение систем сбора статистики автомагистралей, их основных возможностей, проведена оценка их

Репозиторий ВГУ

эффективности в зависимости от используемых типов датчиков.

На основе полученных результатов разработана концепция перспективной системы сбора статистики автомагистралей, основанной на применении гибридной решетки акселерометров, магнетометров и микрофонов. К сожалению, магнетометры не показали необходимой чувствительности и для работы нашей системе было достаточно лишь микрофонов, что значительно удешевило систему.

Впервые в акустической решетке использованы МЭС микрофоны. Произведен анализ существующих электронных компонентов для проектирования гибридных решеток и из них выбраны оптимальные, на их основе разработаны схема электрическая принципиальная и печатная лата новой системы сбора статистики автомагистралей.

Далее проведен анализ существующих классификаторов аудиосигналов, дана оценка их работы для анализа сейсмических сигналов. На основе данной оценки создан собственный метод классификации целей, а также программы для ПЛИС и микроконтроллера нашего устройства; собраны несколько прототипов системы сбора статистики автомагистралей, произведены их отладка и оценка, рассматривается вопрос о постановке устройства в производство.

*ЛИТЕРАТУРА*


1. STMicroelectronics, Tutorial for MEMS microphones / STMicroelectronics [Electronic resource]. – 2014. – Mode of access: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/%20technical/document/application_note/DM00103199.pdf. – Date of access: 04.01.2016.
2. Burges, C.J. Distortion Discriminant Analysis for Audio Fingerprinting / C.J. Burges, J.C. Platt, S. Jana [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1208286&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F89%2F27190%2F01208286.pdf%3Farnumber%3D1208286. – Date of access: 13.01.2016.
3. Cano, P. Audio Fingerprinting: Concepts and Applications / P. Cano, E. Batlle, E. Gomez [Electronic resource]. – 2005. — Mode of access: http://userpages.umbc.edu/~nikunj1/survey/cano02audio.pdf. – Date of access: 15.01.2016.
4. Haitsma, J. Highly Robust Audio Fingerprinting System / J. Haitsma, A. Kalker [Electronic resource]. – 2002. – Mode of access: https://wikis.utexas.edu/download/attachments/3736533/ismir2002.pdf. – Date of access: 15.01.2016.
5. Wang, Avery Li-Chun. An Industrial-Strength Audio Search Algorithm / Avery Li-Chun Wang [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access: http://www.ee.columbia.edu/~dpwe/papers/Wang03-shazam.pdf. – Date of access: 18.01.2016.


*REFERENCES*


1. STMicroelectronics, Tutorial for MEMS microphones / STMicroelectronics [Electronic resource]. – 2014. – Mode of access: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/%20technical/document/application_note/DM00103199.pdf. – Date of access: 04.01.2016.
2. Burges, C.J. Distortion Discriminant Analysis for Audio Fingerprinting / C.J. Burges, J.C. Platt, S. Jana [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1208286&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F89%2F27190%2F01208286.pdf%3Farnumber%3D1208286. – Date of access: 13.01.2016.
3. Cano, P. Audio Fingerprinting: Concepts and Applications / P. Cano, E. Batlle, E. Gomez [Electronic resource]. – 2005. — Mode of access: http://userpages.umbc.edu/~nikunj1/survey/cano02audio.pdf. – Date of access: 15.01.2016.
4. Haitsma, J. Highly Robust Audio Fingerprinting System / J. Haitsma, A. Kalker [Electronic resource]. – 2002. – Mode of access: https://wikis.utexas.edu/download/attachments/3736533/ismir2002.pdf. – Date of access: 15.01.2016.
5. Wang, Avery Li-Chun. An Industrial-Strength Audio Search Algorithm / Avery Li-Chun Wang [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access: http://www.ee.columbia.edu/~dpwe/papers/Wang03-shazam.pdf. – Date of access: 18.01.2016.


*Поступила в редакцию 16.02.2016*

***Адрес для корреспонденции:*** e-mail: rutcode@gmail.com – Ермашкевич Е.А.

Репозиторий ВГУ