

УДК 004.93 + 62.51 + 625.03

ОЦЕНИВАНИЕ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТОМЕТРА

В. М. Бардов¹,

аспирант

Д. Е. Обертов²,

аспирант

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

Ставится задача оценки скорости транспортных средств по показаниям одного магнитометра, вмонтированного в дорожное покрытие. Определение скорости предлагается выполнять в два этапа: по показаниям магнитометра определяется класс транспортного средства и его магнитная длина; по результатам сравнения полученной магнитной длины с соответствующим стандартным значением, взятым из базы данных для данного класса, определяется скорость. Согласно экспериментам, проведенным на реальной дороге, точность оценки составляет более 90 %.

Ключевые слова — магнитометр, идентификация скорости, определение скорости транспортных средств, интеллектуальные транспортные системы.

Введение

Согласно отчету Всемирной организации здравоохранения за 2009 г. [1], в 49 странах Европы в дорожно-транспортных происшествиях погибло 120 тыс. чел. и 2,4 млн получили травмы различной степени сложности.

Система пассивной безопасности (подушки, ремни и т. д.) предназначена для защиты пассажиров при аварии, но не для ее предотвращения. Система активной безопасности (антипробуксовочная система, электронная блокировка дифференциала и т. д.) позволяет в различных критических ситуациях сохранить контроль над автомобилем. Все эти системы действуют в условиях данного транспортного средства (ТС), а поведение других участников дорожного движения не принимается во внимание.

¹ Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент кафедры СУиИ Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики *С. В. Арановский*.

² Научный руководитель — доктор технических наук, профессор кафедры СУиИ Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики *Б. Р. Андреевский*.

В настоящее время активно развиваются методы снижения риска аварий, основанные на так называемой «совместной инфраструктуре» [2–5]. Данный подход используется в проекте iRoad Технического университета г. Лулео и предполагает создание интеллектуальной дорожной инфраструктуры, представленной сетью чувствительных узлов (набором датчиков), расположенных на дорожной разметке [6–8]. Идея заключается в том, что каждый чувствительный узел предоставляет информацию о текущей ситуации на отдельном участке дороги. Затем все поступившие данные централизованно обрабатываются, и, например, в случае обгона с выездом автомобиля на встречную полосу движения производится предварительная проверка наличия каких-либо препятствий для совершения данного маневра.

Для анализа текущей дорожной ситуации и выработки соответствующих рекомендаций метод «совместной инфраструктуры» требует наличия следующей информации о каждом проезжающем ТС [8]: количество осей, скорость и курсовой угол, колесная база, боковое положение, нагрузка на оси, класс.

Данная работа ставит конечной целью синтез алгоритма оценки скорости проезжающего ТС, так как данный параметр играет важную роль

при прогнозировании дальнейшего развития дорожной ситуации.

В настоящее время существует множество различных средств мониторинга дорожной ситуации [9], которые можно разделить на стационарные, т. е. встраиваемые, внедряемые, в данном случае в дорожное покрытие, и нестационарные.

Стационарные устройства (например, магнитометр, индуктивный петлевой датчик и др.) требуют монтажа чувствительных элементов непосредственно в дорожное покрытие.

Нестационарные устройства (радар, видеосистема, ультразвуковой сенсор и др.) размещаются вдоль полос движения без дополнительных дорожных работ. Тем не менее, данные системы требуют больших вычислительных мощностей, и их стоимость на порядок выше стационарных, что особенно актуально, если учесть, что для реализации «совместной инфраструктуры» необходима не одна тысяча таких устройств. Таким образом, использование стационарных средств предпочтительней.

В работах [10–12] предложен метод оценки скорости с использованием двух магнитометров за счет измерения времени проезда автомобиля от одного датчика к другому. Такой способ требует идеальной синхронизации датчиков, которой на практике сложно добиться [2].

В статье [12] предлагается использовать лишь один магнитометр, но при этом оценка скорости производится делением среднестатистического магнитного пути на время проезда ТС мимо датчика. Очевидно, что такой способ не учитывает индивидуальные параметры автомобиля и обладает существенной погрешностью. В настоящей работе ставится задача оценки скорости с использованием одного сенсорного узла, состоящего из магнитометра, с целью избежать проблемы синхронизации датчиков.

Алгоритм оценки скорости транспортного средства на основе измерения магнитного пути

Теоретические сведения, описание метода

Если представить ТС как набор из i элементарных частей, каждая из которых обладает индивидуальным магнитным моментом, то движение автомобиля в магнитном поле можно рассматривать как движение результирующего магнитного момента, магнитное поле которого описывается уравнением Максвелла в соответствии с принципом суперпозиции [13]:

$$B(\mu_i, r_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{3(\mu_i r_i) r_i - \mu_i |r_i|^2}{|r_i|^5}, \quad (1)$$

где B — вектор магнитной индукции; μ_0 — магнитная постоянная; μ_i — магнитный момент i -го

диполя; r — вектор, проведенный из начала координатной системы, связанной с датчиком, к i -му вектору магнитного момента.

Очевидно, что результирующий магнитный момент зависит от конструктивных особенностей автомобиля (формы кузова, материалов и т. д.), а это значит, что для автомобилей одинаковой конструкции можно говорить о равенстве векторов результирующих магнитных моментов μ_{total} . Таким образом, очевидно, что автомобили одного класса, а значит, и примерно одинакового конструктивного исполнения вносят одинаковые возмущения в магнитное поле датчика.

Предположим теперь, что автомобили одного класса (с одинаковыми векторами результирующих магнитных моментов μ_{total}) движутся по одной линии относительно датчика с одинаковыми скоростями V (т. е. $r(t)$ для данных ТС равны) и проходят расстояние S за t секунд. В таком случае, согласно формуле (1), результаты измерений проекций B_X и B_Y будут равны, а также будут равны и углы α , рассчитанные по формуле

$$\alpha(t) = \text{arctg} \left(\frac{B_X(t)}{B_Y(t)} \right). \quad (2)$$

Обозначив за t_{-40} время, при котором $\alpha(t) = -40$, а за t_{+40} — время, при котором $\alpha(t) = +40$, временной интервал между ними (рис. 1) найдем по формуле

$$t_M = t_{+40} - t_{-40}. \quad (3)$$

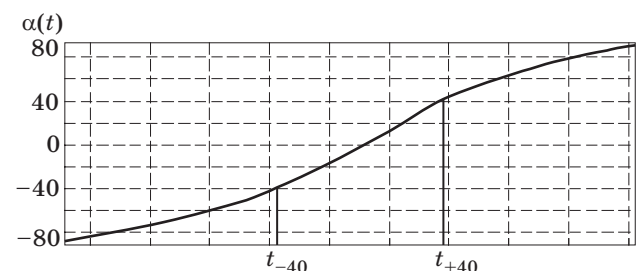
Тогда путь (назовем его магнитным путем S_M), пройденный автомобилем за время t_M , можно найти по формуле

$$S_M = (t_{+40} - t_{-40})V = t_M V, \quad (4)$$

где V — скорость автомобиля.

Предположим теперь, что все исследуемые нами автомобили движутся по прямой линии, перпендикулярной (или параллельной) осям датчика, тогда магнитный путь S_M , согласно формулам (1), (4), зависит от:

- скорости V ТС;
- расстояния от траектории движения до датчика, так как при изменении данного расстояния изменится и $r(t)$;



■ Рис. 1. Магнитный путь автомобиля

— класса ТС, так как от класса будет зависеть и μ_{total} .

Таким образом, внося допущение, что расстояние от траектории движения до датчика постоянное для всех исследуемых ТС, т. е. ограничившись тем, что производится оценка скорости автомобилей, движущихся только по ближней к датчику полосе, для ТС одного класса получим одинаковое значение магнитного пути S_M :

$$S_M = t_{M1}V_1 = t_{M2}V_2 = \dots = t_{Mn}V_n, \quad (5)$$

где n — количество исследуемых автомобилей одного класса.

Создав экспериментальным путем базу данных, в которой для каждого класса записаны эталонные значения t_{M_E} для известной скорости V_E , неизвестную нам скорость найдем по формуле, вытекающей из уравнения (5):

$$V = \frac{t_{M_E}V_E}{t_M}, \quad (6)$$

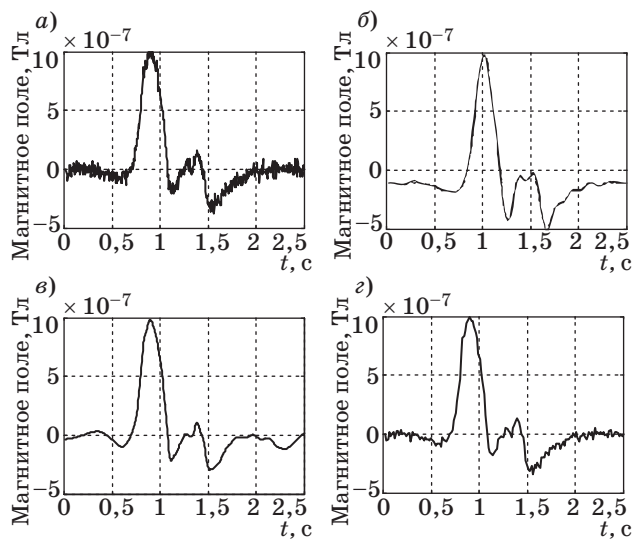
где t_M — время, за которое исследуемый автомобиль проезжает магнитный путь S_M .

Обработка сигнала

Проведем сравнение различных методов обработки сигнала — сглаживания и фильтрации шумовых воздействий и помех.

1. *Фильтр нижних частот* был реализован с использованием функции `ellip` библиотеки обработки сигналов (Signal Processing Toolbox) MatLab с частотой среза 7 Гц.

2. *Вейвлет-фильтр* был реализован с применением библиотеки вейвлетов (Wavelet Toolbox)



■ **Рис. 2.** Сравнение различных методов обработки сигнала: исходный сигнал (а); сигнал после обработки фильтром нижних частот (б), вейвлет-фильтром (в) и методом скользящего среднего (г)

MatLab. В качестве вейвлет-функции использовалась функция Добеши 7-го порядка, количество уровней разложения сигнала также равно 7.

3. *Метод скользящего среднего (moving average)* предполагает сглаживание сигнала за счет замены n точек данных их средним значением. В данной работе $n = 3$.

Для сравнения представленных методов была проведена обработка сигнала, полученного измерением осью X магнитометра магнитного поля автомобиля с прицепом (рис. 2, а–г).

Как видно из рисунков, все фильтры неплохо справились со своей задачей, но фильтр нижних частот вносит в сигнал временное смещение, а вейвлет-фильтр требует значительных вычислительных мощностей, поэтому в дальнейшем будем использовать метод скользящего среднего.

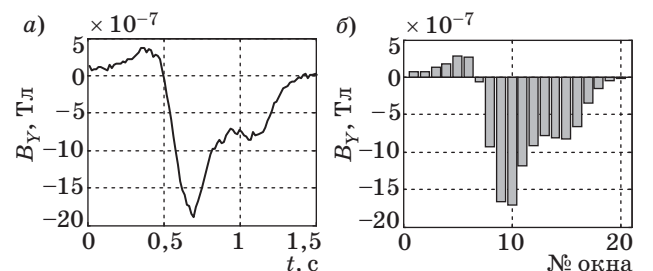
Классификация транспортных средств

Для определения скорости автомобиля по формуле (6) необходимо знать его класс, причем, согласно FHWA (Федеральное управление автомобильных дорог, США), автомобили классифицируются по количеству осей и расстоянию между ними. Нам же необходимо классифицировать автомобили по их магнитным свойствам, т. е. по магнитному пути на фиксированной скорости, например, при $V_E = 30$ км/ч.

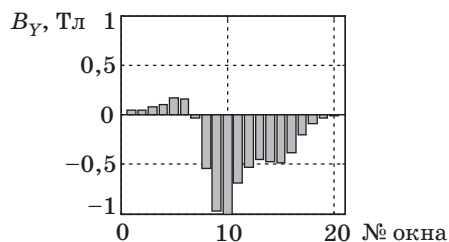
Для классификации ТС используем метод среднего значения (average-var) [11]. Данный метод предполагает классифицировать ТС по их «подписям» — измерениям проекций B_X , B_Y и B_Z .

В соответствии с методом, изложенным в работе [11], измерения магнитометра в промежутке въезда и выезда автомобиля в зону чувствительности датчика (от t_A до t_D соответственно) по каждой оси разделяются на 20 окон (равных временных интервалов), и для каждого окна находится среднее значение (рис. 3, а, б). Полученные средние значения нормируются в пределах $[-1, 1]$ (рис. 4).

Нормированные значения $x_{measured}$ сравниваются с эталонными значениями x_{etalon} , записанными в базе (табл. 1), для этого вычисляется ев-



■ **Рис. 3.** Нахождение среднего значения измерений оси Y для пассажирского автомобиля с прицепом на скорости 50 км/ч: а — исходный сигнал; б — усредненный



■ Рис. 4. Нормированное среднее значение

■ Таблица 1. Структура базы данных

№ класса	Эталонные значения подписи			V_E	S_{M_E}	t_{M_E}
	x_{etalon_1}	x_{etalon_2}	x_{etalon_60}			
1	$x_{etalon_1,1}$	$x_{etalon_1,2}$	...	V_{E_1}	$S_{M_E_1}$	$t_{M_E_1}$
2	$x_{etalon_2,1}$	$x_{etalon_2,2}$	...	V_{E_2}	$S_{M_E_2}$	$t_{M_E_2}$
...
n	$x_{etalon_n,1}$	$x_{etalon_n,2}$	...	V_{E_n}	$S_{M_E_n}$	$t_{M_E_n}$

евклидово отклонение по всем трем осям для каждого из 20 окон:

$$Ed = \sqrt{\sum_{i=1}^{60} (x_{etalon} - x_{measured})^2}. \quad (7)$$

Класс, соответствующая строка которого в базе имеет наименьшее евклидово отклонение от измеренных данных, и есть класс исследуемого автомобиля.

Для снижения потребляемых вычислительных мощностей, а это особенно актуально при использовании микроконтроллера, можно использовать метод сжатия данных [14] и вместо 60 точек $x_{measured}$ и x_{etalon} использовать только 5 [11], но такое сокращение может привести к росту ошибок при классификации автомобиля.

План работы алгоритма оценки скорости

В соответствии с описанным выше методом оценка скорости проводится по следующему плану.

1. По результатам сравнения методом среднего значения данных, полученных в результате измерений, и данных, хранящихся в базе, определяется класс ТС.

2. По формулам (2), (3) рассчитываются значения функции $\alpha(t)$ и находится значение t_M .

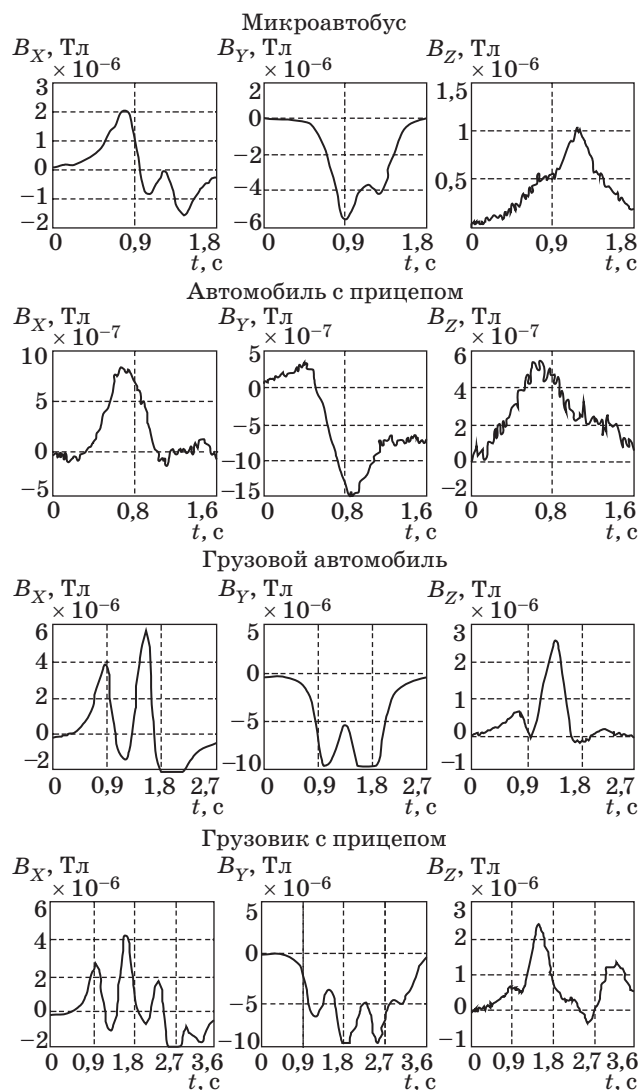
3. По формуле (6) подстановкой t_{M_E} и V_E для данного класса находится скорость исследуемого автомобиля.

Для автоматизированного определения скорости в приложении MatLab была написана соответствующая программа.

Результаты эксперимента

В качестве анализируемых данных использовались измерения, полученные в ходе 20 экспериментов на полигоне Arctic Falls (Швеция) с ТС четырех различных классов (по FHWA): микроавтобусом, автомобилем с прицепом, грузовым автомобилем, грузовиком с прицепом, — движущимися по ближней относительно датчика полосе на скоростях 30, 40, 50, 60 и 70 км/ч. Для измерения реальной скорости использовался датчик фирмы Raselogic, точность которого составляет 0,1 км/ч.

В качестве эталонных для каждого из представленных классов были взяты данные, полученные на скорости 30 км/ч (рис. 5). Видно, что данные значительно отличаются, и разделение автомобилей на классы по их магнитным свойствам соответствует классификации по FHWA (табл. 2).



■ Рис. 5. Измерения проекций магнитного поля V_X , V_Y и V_Z для каждого из рассматриваемых классов автомобилей, движущихся на скорости 30 км/ч

■ Таблица 2. Классификация исследуемых ТС по их магнитным свойствам

Транспортное средство	Класс	Магнитный путь S_{M_E} , м	Временной интервал t_{M_E} , с
Renault Passenger	Микроавтобус	6,0947	0,7314
Saab 93 с прицепом	Автомобиль с прицепом	8,9540	1,0745
Scania 144g	Грузовой автомобиль	10,7814	1,2938
Scania 144g с прицепом	Грузовик с прицепом	20,5040	2,4605

В качестве примера, иллюстрирующего работу алгоритма, рассмотрим задачу оценки скорости автомобиля с прицепом в соответствии с планом (реальная скорость данного автомобиля равна 50 км/ч).

1. Проанализировав данные, программа определила класс ТС верно — «автомобиль с прицепом». На рис. 6, а, б представлены рассчитанное нормированное среднее значение подписи исследуемого автомобиля и эталонное, взятое для данного класса из базы.

Евклидово отклонение составило всего 0,89577, в то время как второе минимальное значение равно 2,0883, что говорит о запасе погрешности при определении класса.

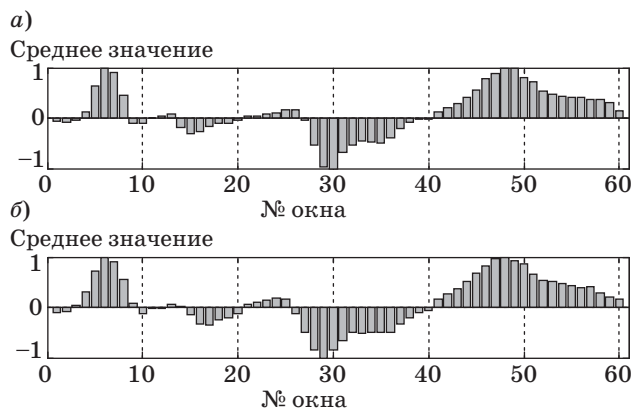
2. Результаты вычисления функции $\alpha(t)$ представлены на рис. 7. Значение временного интервала $t_M = 0,6631$ с.

3. По формуле (6) была найдена скорость

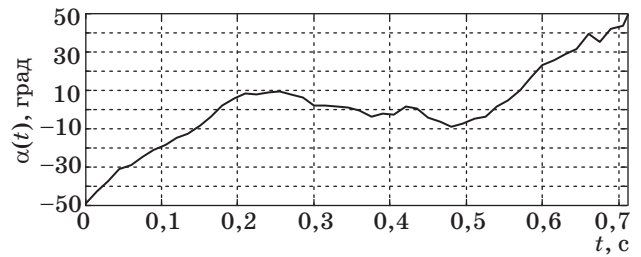
$$V = \frac{t_{M_E} V_E}{t_M} = \frac{1,0745 \cdot 30}{0,6631} \approx 48,6 \text{ м/с}.$$

Таким образом, погрешность оценки скорости составила всего

$$\text{error} = \frac{50 - 48,6}{50} = 2,8\%.$$



■ Рис. 6. Нормированное среднее (а) и эталонное (б) значения подписи исследуемого автомобиля



■ Рис. 7. График функции $\alpha(t)$ для автомобиля с прицепом, движущегося со скоростью 50 км/ч

■ Таблица 3. Результат работы алгоритма оценки скорости на основе измерения магнитного пути

№ п/п	Транспортное средство	Результат оценки класса	Оценка скорости, км/ч		Ошибка, %
			Оценка скорости, км/ч	Реальная скорость, км/ч	
1	Saab 93 с прицепом	Автомобиль с прицепом	Эталон		
2	То же	То же	40,0761	40	0,19025
3	— » —	— » —	48,6126	50	2,7748
4	— » —	— » —	56,7537	60	5,4105
5	— » —	— » —	67,66	70	3,34286
6	Renault Passenger	Микроавтобус	Эталон		
7	То же	То же	Плохие данные измерений		
8	— » —	— » —	46,931	50	6,138
9	— » —	— » —	54,8026	60	8,66233
10	— » —	— » —	64,6703	70	7,61386
11	Scania 144g	Грузовой автомобиль	Эталон		
12	То же	То же	41,2945	40	3,23625
13	— » —	— » —	50,5588	50	1,1176
14	— » —	— » —	61,2431	60	2,07183
15	— » —	— » —	70,5456	70	0,77943
16	Scania 144g с прицепом	Грузовик с прицепом	Эталон		
17	То же	То же	Плохие данные измерений		
18	— » —	— » —	50,9441	50	1,8882
19	— » —	— » —	61,3146	60	2,191
20	— » —	— » —	71,9189	70	2,74123

Аналогично были проверены остальные 13 наборов экспериментальных данных. Максимальная ошибка измерения составила 8,67 % (табл. 3).

Заключение

В данной работе ставилась задача оценки скорости автомобиля по результатам измерений од-

ного магнитометра, расположенного на дорожном покрытии.

Предложен метод оценки скорости ТС на основе измерения магнитного пути. Проанализировав модель магнитного поля, авторы пришли к выводу, что у ТС с одинаковыми магнитными свойствами магнитный путь пропорционален скорости. Таким образом, зная эталонный магнитный путь для данного класса, т. е. путь на известной скорости, можно определить скорость исследуемого автомобиля. При использовании данного метода вводится ряд допущений:

- автомобиль движется по прямой линии по ближней к датчику полосе;
- автомобили не перевозят металлические предметы, которые могут внести дополнительные возмущения в измеряемом магнитном поле;
- между исследуемыми автомобилями соблюдается такая дистанция, при которой отсутствует возмущение, вносимое одним автомобилем, влияющее на измерения магнитного поля другого.

При такой постановке задачи оценка скорости осуществляется с точностью более 90 %. Погрешность 10 % можно объяснить наличием помех и небольшим варьированием расстояния между датчиком и траекторией движения ТС при эксперименте. Также стоит заметить, что при исследо-

вании реального дорожного трафика разница магнитных путей между соседними классами будет незначительной, как незначительными будут и различия магнитных подписей. Таким образом, случаи неправильной классификации ТС возможны, но они не приведут к значительным ошибкам оценки скорости.

Ввиду того, что данный алгоритм предполагается реализовать с использованием микроконтроллеров, а сами сенсорные узлы будут вмонтированы в асфальт, предусмотрен способ снижения потребляемой энергии и вычислительных мощностей за счет использования метода сжатия данных [14].

В работах [11–13] предложены алгоритмы оценки скорости с использованием двух сенсорных узлов за счет измерения времени проезда автомобиля от одного датчика к другому. При такой постановке возникает проблема синхронизации данных [3], а оценки скорости получаются с большой погрешностью. Таким образом, удалось решить означенную проблему, используя данные только с одного сенсорного узла.

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

Литература

1. **Global Status Report On Road Safety — Time For Action.** — World Health Organization (WHO), 2009. — 287 p.
2. **Isaksson M.** Vehicle detection using anisotropic magnetoresistors: Master's thesis. — Chalmers University of Technology, 2008. — 66 p.
3. **Sullivan J. M., Winker C. B., Hagan M. R.** Smart barrel for an adaptive queue-warning systems, tech. rep. — University of Michigan, Feb. 2005. — 118 p.
4. **Misener J., Shladover S.** PATH investigation in vehicle-roadside cooperation and safety: A foundation for safety and vehicle-infrastructure integration research // Intelligent transportation systems Conf. (ITSC'06) // IEEE. 2006. P. 9–16.
5. **Coleri S., Cheung S. Y., Varaiya P.** Sensor networks for monitoring traffic // Communication, control, and computing: 42th Annual Allerton Conf. 2004. Vol. 2. P. 883–893.
6. **Hostettler R., Birk W., Nordenvaan M. L.** Feasibility of road vibration-based vehicle property sensing // Intelligent transport systems. IET. 2010. Vol. 4. P. 356–364.
7. **Birk W.** et al. Road surface networks technology enablers for enhanced ITS // IEEE VNC 2010 Conf. proceeding. 2010. P. 152–159.
8. **Hostettler R.** Traffic counting using measurements of road surface vibrations: Master's thesis. — Lulea University of Technology, 2009. — 81 p.
9. **Zhang Y., Bruce L. M.** Automated accident detection at intersections. — Final Report of Mississippi Transportation Research Center, 2004. — 66 p.
10. **Cheung S. Y., Ergen S. C., Varaiya P.** Traffic surveillance with wireless magnetic sensors // Proc. of the 12th ITS World Congress. 2005. Vol. 1917. P. 173–181.
11. **Cheung S. Y., Varaiya P.** Traffic surveillance by wireless sensor networks: Final report. — California PATH Research Report, 2007. — 161 p.
12. **Cheung S. Y.** et al. Traffic measurement and vehicle classification with a single magnetic sensor // Proc. of the Annual Meeting of the transportation research board. 2005. Vol. X. P. 173–181.
13. **Johansson C., Jonasson C., Erlandsson M.** Magnetic sensors for traffic detection: Technical report. — IMEGO. Sweden, 2006. — 86 p.
14. **Chen C. S., Huo K. S.** Karhunen-loeve method for data compression and speech synreport // IEEE Proc.-I. 1991. Vol. 138. N 5. P. 377–380.