

УДК 681.5.08

UDC 681.5.08

**МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В
ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЗОНЕ ПАССИВНОГО
АКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА
ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА**

**VEHICLE DETECTION METHOD IN
SENSITIVE ZONE OF PASSIVE ACOUSTIC
TRANSPORT DETECTOR**

Посмитный Евгений Владимирович
к.т.н., доцент

Posmitniy Eugene Vladimirovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor

Медовщиков Максим Игоревич
аспирант
*Кубанский государственный технологический
университет, Краснодар, Россия*

Medovschikov Maxim Igorevich
postgraduate student
*Kuban state university of technology, Krasnodar,
Russia*

В статье рассматривается методика определения наличия транспортного средства в чувствительной зоне пассивного акустического транспортного детектора. Описан принцип определения скорости транспорта по акустическим данным, проведён аналитический обзор методов обнаружения движущегося объекта, проведено исследование математической модели рассматриваемого транспортного детектора. В результате предложен критерий определения наличия транспортного средства по акустическим данным

In this article, transport detection method in sensitive zone of passive acoustic transport detector is considered. The transport speed estimation by acoustic data principle is described, an analytical survey for moving object detection is performed, and the mathematical model of described transport detector is investigated. As the result of this work, a transport detection criteria using acoustic data is suggested

Ключевые слова: ПАССИВНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТНЫЙ ДЕТЕКТОР, ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА, ПОРОГОВЫЙ МЕТОД, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Keywords: PASSIVE ACOUSTIC TRANSPORT DETECTOR, MOVING OBJECT DETECTION, THRESHOLD METHOD, MATHEMATIC MODEL

Задачей пассивного акустического детектора транспортного потока является определение скорости транспортных средств, пересекающих чувствительную зону устройства. Принцип определения скорости транспортного средства по акустическим данным без генерации дополнительного излучения основан на поиске максимального значения взаимнокорреляционной функции от двух потоков акустических данных, полученных со звуковых приёмников, расположенных на заданном расстоянии друг от друга вдоль линии движения транспорта. При этом применение взаимнокорреляционной функции не позволяет однозначно определить факт наличия транспортного средства в чувствительной зоне детектора.

В данной работе рассматривается проблема определения наличия транспортного средства в чувствительной зоне пассивного акустического транспортного детектора. Проводится аналитический обзор методов обна-

ружения движущегося объекта по акустическим данным, а также проводится исследование математической модели транспортного детектора в условиях наличия и отсутствия транспортного средства.

Учитывая актуальность разработки новых более эффективных по стоимости и затратам энергии транспортных детекторов для интеллектуальных транспортных систем, активно развиваемых в настоящее время, рассматриваемая в данной работе проблема также является актуальной.

1 Состояние исследований и актуальность работы

1.1 Принцип определения скорости транспортного средства по акустическим данным

Определение скорости транспортного средства возможно произвести по излучаемому им акустическому шуму [1]. Рассматриваемый в данной работе принцип определения скорости транспортного средства по акустическим данным предполагает наличие двух звуковых приёмников, расположенных вдоль линии движения транспортного средства на заданном расстоянии друг от друга, см. рисунок 1.

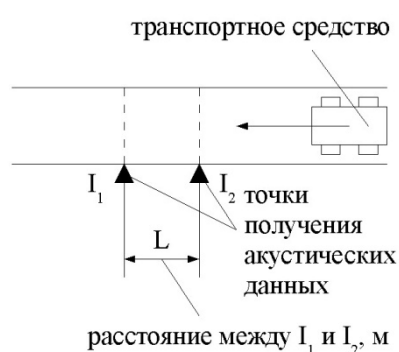


Рисунок 1 – Схема получения акустических данных

Определение скорости транспортного средства производится путём сравнения массивов акустических данных (профилей сигналов), получаемых со звуковых приёмников. Транспортное средство, обладая конечной скоростью, приближается к звуковым приёмникам поочередно. Таким образом, разница акустических данных в профилях сигналов, полученных от приёмников, отражает время, затраченное транспортным средством на перемещение от одного звукового приёмника к другому. Далее в работе такое время называется временем перехода транспортного средства.

Для нахождения времени перехода используются поисковые методы оптимизации с применением взаимнокорреляционной функции (в качестве целевой) от двух полученных профилей сигналов. Целевая функция имеет следующий вид:

$$S(d) = \frac{\sum_{i=T1}^{T2} (A(i) \cdot B(i+d))}{T2 - T1} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где:

A , B – дискретные массивы полученных акустических данных, где индексом является дискретное время, а значением элемента массива является дискретный уровень сигнала (дискретная амплитуда);

$T1$, $T2$ – начальный и конечный дискретный момент времени получения акустических данных. Данные моменты характеризуют интервал, в котором производится поиск времени перехода транспортного средства;

d – смещение дискретного времени профиля сигнала, полученного со второго акустического приёмника.

Величина дискретного интервала времени соответственно зависит от частоты дискретизации акустических данных, получаемых с приёмников:

$$T = 1/f. \quad (2)$$

В общем случае оптимальное смещение дискретного времени ($d_{\text{опт}}$) можно определить прямым перебором возможных смещений в рамках заданного интервала (в рамках заданной области d), и выбора наибольшего

значения взаимнокорреляционной функции. Такой подход оправдан только в случае наличия помех высокого уровня в полученных акустических данных. При этом высоким уровнем помех считается такой уровень, который создаёт погрешность определения $d_{\text{опт}}$ и, как следствие, погрешность определения скорости транспортного средства выше изначально заданной погрешности определения скорости для конкретной прикладной задачи.

При незначительном уровне помех возможно использование одномерных поисковых методов (например, метод золотого сечения) для определения $d_{\text{опт}}$.

Найденное оптимальное смещение дискретного времени $d_{\text{опт}}$ соответствует времени перехода транспортного средства от одного акустического приёмника к другому:

$$t_{\text{опт}} = d_{\text{опт}} \cdot T. \quad (3)$$

Соответственно, в таком случае скорость транспортного средства определяется следующим образом:

$$V = L/t_{\text{опт}}, \quad (4)$$

где:

V – скорость транспортного средства, м/с;

L – расстояние между акустическими приёмниками, м;

$t_{\text{опт}}$ – время перехода транспортного средства, с.

1.2 Проблема определения наличия транспортного средства и актуальность её решения с позиции акустического детектирования

Описанный в подразделе 1.1 принцип акустического определения скорости транспортного средства не позволяет определить наличие, либо отсутствие транспортного средства в зоне детектирования. Таким образом, в случае отсутствия транспортного средства в зоне детектирования, вели-

чина скорости может принимать случайное значение в широкой области допустимых значений, включая область адекватных значений скорости при наличии транспортного средства.

Описанная проблема лишает принцип акустического определения скорости транспортного средства практической применимости. Для практической применимости описанного принципа необходима возможность определения факта присутствия транспортного средства на анализируемом временном интервале.

Учитывая актуальность разработки новых принципов определения скорости транспортного потока для развития интеллектуальных транспортных систем [2] описанная проблема также является актуальной.

Таким образом, объектом данной работы является разрабатываемый принцип акустического определения скорости транспортного средства.

Предметом данной работы является математическая модель акустического транспортного детектора.

Целью данной работы является поиск решения задачи определения наличия транспортного средства во временном интервале, на котором производится анализ в соответствии с формулами (1–4).

В данной работе поставлены следующие задачи:

- аналитический обзор методов обнаружения движущегося объекта по акустическим данным;
- исследование математической модели акустического детектора в условиях наличия и отсутствия движущегося транспортного средства, формализация критерия обнаружения;

2 Требования к методу определения наличия транспортного средства по акустическим данным

Разрабатываемый акустический детектор можно отнести к классу пассивных акустических детекторов [3].

К основным достоинствам пассивных акустических детекторов транспортного потока относятся следующие:

- малое энергопотребление;
- простота конструкции по сравнению с активными детекторами;
- сложность обнаружения детектора по акустическим и электромагнитным излучениям;
- сложность скрытия реальной скорости транспортного средства путём подмены акустического излучения.

К основным недостаткам пассивных акустических детекторов транспортного потока относятся следующие:

- высокая вычислительная нагрузка, необходимая для обработки акустических данных;
- принципиальная сложность идентификации транспортного средства.

Требования, предъявляемые к разрабатываемому методу определения наличия транспортного средства, формируются с учётом максимального сохранения принципиальных достоинств при отсутствии получения новых существенных недостатков.

Таким образом, предъявляются следующие требования:

- минимальная вычислительная нагрузка;
- отсутствие какого-либо генерируемого (активного) излучения (акустического, либо электромагнитного);
- минимальное усложнение конструкции устройства.

3 Аналитический обзор методов обнаружения движущегося объекта по акустическим данным

Задача определения наличия движущегося транспортного средства по акустическим данным является частным случаем задачи обнаружения движущегося протяжённого объекта.

Постановку задачи обнаружения движущегося объекта по акустическим данным, а также методы её решения можно найти в радиолокации, гидролокации и гидроакустике [4-6].

Можно выделить следующие основные методы обнаружения [4]:

- 1) активные;
 - 1.1) непрерывные;
 - 1.2) импульсные;
- 2) пассивные.

Активные методы обнаружения в данной работе не рассматриваются ввиду выбранных требований к разрабатываемому методу.

Среди пассивных методов можно выделить следующие [5, 6]:

- амплитудные;
- фазовые;
- с использованием эффекта Доплера;
- с использованием акустических сигнатур;
- пороговые.

Амплитудные и фазовые методы обнаружения предполагают наличие массива приёмников и узкополосных фильтров. Массив приёмников обычно распределяется по линии, либо решёткой. После фильтрации поступающих акустических сигналов производится построение диаграммы

направленности, позволяющей определить не только наличие объекта в детектируемой зоне, но и направление его движения.

При этом полосовые фильтры могут быть реализованы как аппаратно, так и программно при помощи цифрового сигнального процессора.

Для данных методов можно выделить следующие особенности:

- дополнительные конструктивные требования (установка дополнительных звуковых приёмников, а также возможна аппаратная реализация фильтров);

- высокая вычислительная нагрузка в случае программной реализации фильтрации сигналов.

Метод с использованием эффекта Доплера предполагает сравнение спектра испускаемого акустического сигнала движущегося объекта, либо с эталонным спектром прототипа объекта, либо со спектром того же объекта после смены направления его движения (например, сначала приближение, затем удаление).

Принципиальной особенностью данного метода является необходимость выделения предварительно заданного спектра объекта. В случае, когда объекты легко классифицируемы и испускают узкий спектр акустических сигналов, данный метод является наилучшим. В условиях транспортного потока классификация транспортных средств ввиду их разнообразия может вызвать дополнительные сложности. Также, выделение спектра транспортного средства предполагает применение частотной фильтрации, что повышает вычислительные требования.

Таким образом, для данного метода можно выделить следующие особенности:

- существенная вычислительная нагрузка (ввиду отсутствия многоканальной фильтрации данная нагрузка будет меньше, чем для предыдущих рассмотренных методов).

– необходимость классификации транспортных средств (наличия эталонов спектра), либо необходимость последовательного приближения и удаления обнаруживаемого объекта.

Метод с использованием акустических сигнатур предполагает сравнение полученного спектра акустического сигнала с эталонным спектром [6]. При этом различают два подхода: для случая узкополосного эталонного спектра и широкополосного.

Данный метод также подразумевает выделение спектра сигнала (что повышает требования к вычислительной нагрузке). Дополнительно предъявляется требование к обязательной классификации детектируемых объектов.

Таким образом, можно выделить следующие особенности метода акустических сигнатур:

- существенная вычислительная нагрузка;
- необходимость классификации транспортных средств (наличия акустических сигнатур).

Пороговый метод предполагает выявление характерных максимумов формируемых сигналов на сравнительно равномерном фоне [6]. При этом предъявляются высокие требования к соотношению сигнал-шум, так как от полученного соотношения полезного сигнала к шуму непосредственно зависит вероятность и количество ошибок обнаружения транспортного средства. При этом к методу фильтрации полезного сигнала не предъявляется специфических требований (как, например, выделение определённого спектра сигнала), что позволяет выбирать методы более гибко по отношению к вычислительной нагрузке.

Таким образом, для порогового метода можно выделить следующие особенности:

- вычислительная нагрузка зависит от выбранного метода фильтрации;

– высокие требования к соотношению сигнал-шум.

Пороговый метод предоставляет наибольшую гибкость в выборе вычислительной нагрузки, а также не предъявляет дополнительных конструктивных требований. Поэтому в данной работе за основу был выбран пороговый метод.

При этом для случая обнаружения транспортного средства требуется модификация данного метода по причине возможного наличия шумов высокого уровня (сравнимого с уровнем полезного сигнала).

4 Исследование математической модели пассивного акустического транспортного детектора для случаев наличия и отсутствия транспортного средства

Для применения порогового метода необходимо произвести предварительную фильтрацию поступающих акустических данных, увеличив соотношение сигнал шум. В данной работе в качестве фильтра выбран метод скользящего среднего.

При этом прямое применение порогового метода затруднительно, так как условия, в которых производится получение акустических данных транспортного средства, предполагают возможное наличие высокоамплитудных акустических шумов (например, шум интенсивного дождя, шум ветра, шум городской улицы).

Для решения проблемы отсеивания высокоамплитудных шумов необходимо использовать методы, позволяющие выделить акустические данные движущегося объекта.

В данной работе произведена попытка исследования математической модели пассивного акустического транспортного детектора с целью выделения сигнала движущегося объекта при сохранении низких требований к вычислительной нагрузке на процессор.

Для проведения исследования математической модели акустического транспортного детектора были получены исходные данные, соответствующие двум исследуемым ситуациям: в момент перемещения транспортного средства через зону детектирования и во время отсутствия транспортных средств.

Для получения исходных данных были поставлены и проведены эксперименты: замеры двухканального звукового профиля для случая перемещающегося транспорта и для случая шумов окружающей среды (случай без транспорта).

Также была разработана имитационная модель пространственного распространения звука, излучаемого от движущегося виртуального транспортного средства.

В таблицах 1 и 2 приведены характеристики фрагментов профилей сигналов для случая отсутствия и наличия транспортного средства.

В первой колонке приведено максимальное значение взаимокорреляционной функции $S(d_{\text{опт}})$ на анализируемом участке в соответствии с формулой (1). В проведённых экспериментах акустические данные были приведены к безразмерным величинам путём деления каждого значения из массива акустических данных на максимально допустимое для используемых акустических приёмников, соответствующее 70 дБ.

Во второй колонке приведено среднее значение $X_{\text{ср}}$ уровня акустического сигнала на анализируемом интервале. В третьей колонке приведено среднее значение $X_{\text{ср.ст.}}$ из старшей половины отсортированной по возрастанию выборки уровней акустического сигнала на анализируемом интервале. В четвёртой колонке приведено среднее значение $X_{\text{ср.мл.}}$ из младшей половины отсортированной по возрастанию выборки уровней акустического сигнала на анализируемом интервале. Все приведённые средние значения также рассчитаны как среднее между первым и вторым акустическими каналами.

Таблица 1. Характеристики фрагментов профилей сигналов для случая отсутствия транспортного средства

$S(d_{\text{опт}})$	$X_{\text{ср}}$	$X_{\text{ср.ст.}}$	$X_{\text{ср.мл.}}$
0.0682	0.2603	0.2647	0.2558
0.1037	0.3218	0.3237	0.3200
0.0984	0.3136	0.3151	0.3121
0.0229	0.1503	0.1614	0.1391
0.0499	0.2233	0.2346	0.2121
0.0973	0.3119	0.3133	0.3105
0.0310	0.1760	0.1857	0.1663
0.0576	0.2399	0.2411	0.2387
0.0602	0.2456	0.2470	0.2441
0.0319	0.1772	0.1875	0.1669

Таблица 2. Характеристики фрагментов профилей сигналов для случая наличия движущегося транспортного средства

$S(d_{\text{опт}})$	$X_{\text{ср}}$	$X_{\text{ср.ст.}}$	$X_{\text{ср.мл.}}$
0.0711	0.2589	0.2636	0.2543
0.0859	0.2893	0.2928	0.2858
0.0926	0.2886	0.2972	0.2800
0.0150	0.0844	0.1178	0.0509
0.0159	0.1135	0.1207	0.1063
0.0814	0.2766	0.2836	0.2695
0.0219	0.1023	0.1384	0.0662
0.0232	0.1434	0.1538	0.1329
0.0451	0.2029	0.2097	0.1961
0.0205	0.0860	0.1212	0.0508

Из представленных таблиц видно то, что выделение среднего значения уровня сигнала на анализируемом отрезке не позволяет определить наличие транспортного средства. Также невозможно сделать вывод о наличии транспорта, используя сортировку уровней сигналов и выделение среднего значения в старшей или младшей половине отсортированного по возрастанию анализируемого отрезка. Максимальные значения взаимно-

корреляционной функции для анализируемых отрезков также не дают достаточной информации.

Так как максимальное значение взаимнокорреляционной функции подразумевает смещение одного из акустических каналов по времени и, таким образом, выделяет сигналы движущихся объектов, поэтому было проведено сравнение средних значений сигналов на анализируемых отрезках с полученными максимальными значениями взаимнокорреляционных функций.

Результаты сравнения приведены в таблице 3 (для случая отсутствия транспортного средства) и в таблице 4 (для случая наличия движущегося транспортного средства).

В первой колонке указана разность $\Delta_{\text{ср}}$ между значением максимальной взаимнокорреляционной функции $S(d_{\text{опт}})$ и квадратом среднего значения $X_{\text{ср}}$ для того же анализируемого участка. Во второй колонке указана разность $\Delta_{\text{ср.ст.}}$ со средним значением $X_{\text{ср.ст.}}$ из старшей половины отсортированной по возрастанию выборки сигналов анализируемого участка. В третьей колонке: разность $\Delta_{\text{ср.мл.}}$ со средним значением $X_{\text{ср.мл.}}$ из младшей половины.

Расчёты разностей производятся по следующим формулам:

$$\Delta_{\text{ср}} = S(d_{\text{опт}}) - (X_{\text{ср}})^2,$$

$$\Delta_{\text{ср.ст.}} = S(d_{\text{опт}}) - (X_{\text{ср.ст.}})^2,$$

$$\Delta_{\text{ср.мл.}} = S(d_{\text{опт}}) - (X_{\text{ср.мл.}})^2.$$

Таблица 3. Сравнение характеристик фрагментов профилей сигналов при отсутствии транспортного средства

$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{ср.ст.}}$	$\Delta_{\text{ср.мл.}}$
0.00044391	-0.00186609	0.00276636
0.00014476	-0.00108169	0.00130000
0.00005504	-0.00088801	0.00099359
0.00030991	-0.00314996	0.00355119

0.00003711	-0.00513716	0.00491359
0.00001839	-0.00085689	0.00088975
0.00002400	-0.00348449	0.00334431
0.00004799	-0.00052921	0.00062231
-0.00011936	-0.00080900	0.00061519
0.00050016	-0.00325625	0.00404439

Таблица 4. Сравнение характеристик фрагментов профилей сигналов при наличии движущегося транспортного средства

$\Delta_{ср}$	$\Delta_{ср.ст.}$	$\Delta_{ср.мл.}$
0.00407079	0.00161504	0.00643151
0.00220551	0.00016816	0.00421836
0.00931004	0.00427216	0.01420000
0.00787664	0.00112316	0.01240919
0.00301775	0.00133151	0.00460031
0.00489244	0.00097104	0.00876975
0.01143471	0.00274544	0.01751756
0.00263644	-0.00045444	0.00553759
0.00393159	0.00112591	0.00664479
0.01310400	0.00581056	0.01791936

Сравнение таблиц 3 и 4 позволяет выделить отличие разности $\Delta_{ср}$ в случаях наличия и отсутствия транспортного средства в зоне детектирования.

На основе полученных эмпирических данных можно предложить гипотезу о наличии транспортного средства, согласно которой превышение разности между максимальной взаимнокорреляционной функцией и средним значением акустического сигнала на одном анализируемом отрезке выше одной тысячной

$$\Delta_{ср} > 0,001, \tag{5}$$

может являться признаком наличия транспортного средства в зоне чувствительности пассивного акустического транспортного детектора.

Таким образом, в качестве критерия, применяемого при использовании порогового метода, может быть использовано соотношение (5).

Заключение и выводы

В данной работе был рассмотрен принцип определения скорости транспортного средства по акустическим данным, получаемым по двум распределённым на заданном расстоянии акустическим приёмникам.

Разрабатываемый транспортный детектор, работающий по рассмотренному принципу, был классифицирован как пассивный акустический транспортный детектор.

В данной работе была поставлена задача определения наличия движущегося транспортного средства в чувствительной зоне пассивного акустического транспортного детектора.

Для решения задачи был проведён аналитический обзор традиционных методов обнаружения движущегося объекта по акустическим данным. В результате обзора был сделан вывод о том, что наиболее подходящим для рассмотренного принципа является пороговый метод.

Прямое применение порогового метода (сравнение по пороговой амплитуде) затруднительно по причине наличия акустических шумов, сравнимых по амплитуде с полезным сигналом. Для модификации порогового метода было проведено исследование математической модели пассивного акустического детектора по исходным данным, полученным в результате проведённых экспериментов в реальных условиях и в имитационной модели.

По результатам исследования математической модели была предложена гипотеза о критерии наличия движущегося транспортного средства в чувствительной зоне акустического транспортного детектора.

Полученный критерий требует дальнейшей дополнительной проверки и возможного уточнения в разнообразных условиях при различных акустических шумах.

Литература

1. Посмитный Е.В., Медовщиков М.И. Разработка прототипа акустического датчика скорости автомобильного потока // Автоматизированные информационные и электро-энергетические системы. Материалы I Межвузовской научно-практической конференции (15-17 сентября 2010 года); М-во обр. и науки РФ, ГОУ ВПО КубГТУ; под общ. ред. проф. В.А. Атрощенко. Краснодар: Издательский дом – Юг, 2010. С 162-164.
2. Посмитный Е.В., Медовщиков М.И., Данич А.А. Получение информации о транспортных средствах в интеллектуальных транспортных системах // Сборник научных трудов факультета КТАС КубГТУ / Кубанский государственный технологический университет. Факультет КТАС. Краснодар: Издательский дом – Юг, 2010. С 12-15.
3. Vehicle Detector Clearing house [Электронный ресурс] : A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies use in Intelligent Transportation Systems. – 2007. – Режим доступа: <http://www.nmsu.edu/~traffic/Publications/Trafficmonitor/vdst.pdf>
4. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1961. 384 с.
5. Вартанесян В.А., Гойхман Э.Ш., Рогаткин М.И. Радиопеленгация. М.: Воениздат, 1966. 248 с.
6. Найт У.С., Придэм Р.Г., Кэй С.М. Цифровая обработка сигналов в гидролокационных системах // ТИИЭР. 1981. Т.69. № 11. С 84-154.