

УДК 539.3

## АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

© Юрий Михайлович Заславский, Владислав Юрьевич Заславский,  
Алексей Михайлович Соков  
ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия  
[zaslav@appl.sci-nnov.ru](mailto:zaslav@appl.sci-nnov.ru)

*Аннотация.* Выполнены натурные эксперименты по регистрации и анализу характеристик внешнего воздушно-акустического шума легкового автомобиля, движущегося по шоссе. Собственный акустический шум регистрируется с помощью одноплечей продольной антенны микрофонов со сканируемой характеристикой направленности. Строятся веерные диаграммы углового распределения интенсивности шума на разных участках движения. Анализируется возможность использования корреляционных характеристик шума, принятого антенной, для определения текущих параметров транспортного средства при его движении в условиях шоссейных дорог.

**Ключевые слова:** внешний акустический шум, интенсивность, веерная диаграмма, антенна микрофонов, движение авто по шоссе.

## ACOUSTIC NOISE OF MOVING MOTOR CAR

© Yu.M. Zaslavsky, V.Yu. Zaslavsky, A.M. Sokov  
IAP RAS, Nizhny Novgorod, Russia  
[zaslav@appl.sci-nnov.ru](mailto:zaslav@appl.sci-nnov.ru)

*Abstract.* The experimental investigations of outer natural noise of motor car quick moving along highway for the analysis of its characteristics are carried out. Air-acoustic field is recorded by lengthwise microphone antenna having scanning directivity pattern. Scanning diagram of acoustical antenna is formed. Ability of remote monitoring of vehicle motion is shown by application of scanning diagram and cross-correlation signal processing with use of offered algorithms. It is demonstrated good agreement of both method with well-known approaches and it provides acceptable determination of current parameters of vehicle motion on roadway.

**Keywords:** outer natural noise, intensity, scanning directivity pattern, microphone antenna, vehicle roadway traffic.

Настоящая работа посвящена решению актуальной прикладной задачи – исследованию возможности удаленного контроля движения легковых автомобилей на основе регистрации их внешнего акустического поля. Для этой цели проведены исследования внешнего акустического шума автомобиля, движущегося по автомагистрали, в которых анализируется возможность получения данных о текущем местоположении (координата или направление на источник шума) и скорости его поступательного движения. Решению аналогичных задач пеленга транспортных объектов на основе регистрации их собственного шума посвящены

многие работы [1-7]. В более общей постановке для их решения привлекаются сигналы, создаваемые полями различной физической природы и принимаемые датчиками всевозможных конструкций. Представим результаты исследования углового распределения интенсивности шума транспортных средств, зарегистрированного в натуральных условиях многоканальным приемником – антенной решеткой микрофонов. Характер смены пространственно-углового распределения интенсивности внешнего шума автомобиля, движущегося по шоссе, лежит в основе удаленного контроля параметров его движения при этом анализ текущей пространственной картины акустического поля возможен на основе формирования азимутальной веерной диаграммы с использованием всей совокупности реализаций шума, регистрируемых антенной при прохождении автомобиля вдоль трассы, как при приближении к приемному пункту – области траверса, так и при последующем удалении от него. Для аналогичных целей удаленного контроля скорости движения городского транспорта ранее уже успешно апробировано применение взаимно-корреляционной обработки сигналов, представляющих собой шум некоторых видов транспорта, регистрируемый многоканальной приемной антенной микрофонов [7].

Натурные эксперименты по регистрации акустического шума, создаваемого легковым автомобилем, быстро движущимся по прямолинейному участку асфальтированной трассы, выполнены в летних безветренных погодных условиях с использованием одноплечей приемной антенны – продольной решетки микрофонов, установленной на обочине (у края полотна дороги  $H = 5 - 7 \text{ м}$ ), при этом схема регистрации шума аналогична описанной в работе [7]. Располагаемая в нескольких см по высоте над травяным покровом антенна ориентирована параллельно движению (см. рис.1 – схема эксперимента) и представляет собой решетку из  $K = 32$  микрофонов. В апертуре антенны микрофоны размещены эквидистантно в линию с шагом  $d = 0.1 \text{ м}$  (электретные микрофоны Panasonic WM-61a с рабочей полосой, перекрывающей диапазон звуковых частот  $50 \dots 16000 \text{ Гц}$ ).

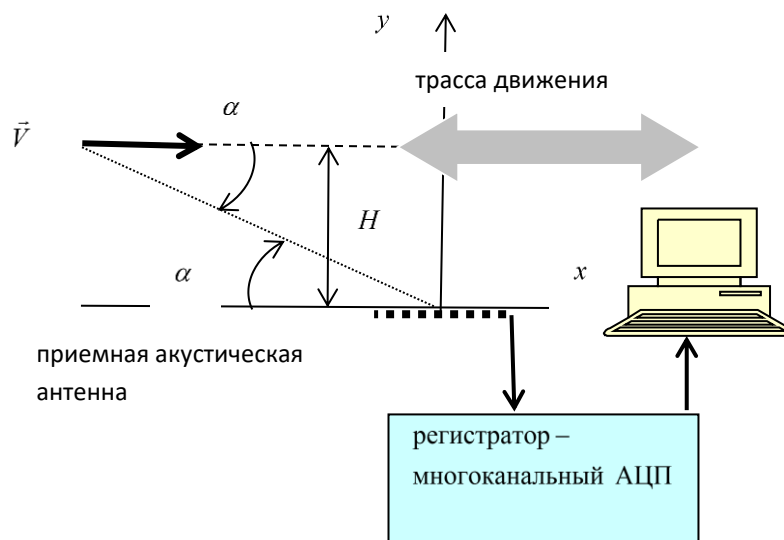


Рис.1. Схема эксперимента, вид сверху

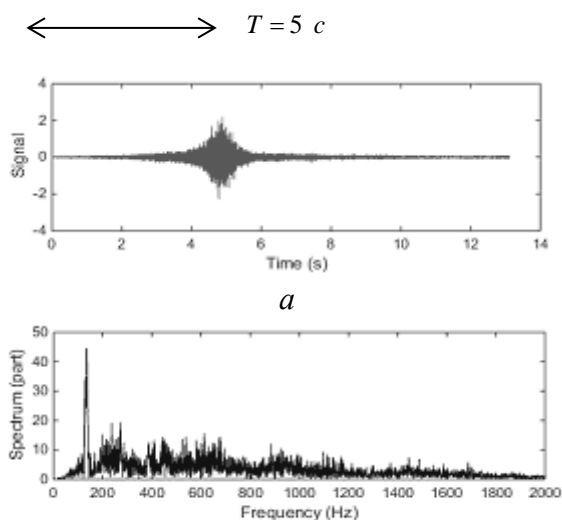
Характерный вид воздушно-акустического шумового сигнала, создаваемого автомобилем, движущимся по шоссе со скоростью  $V \cong 80 \text{ км/час}$ , и регистрируемого одним из микрофонов антенной решетки, представлен на рис.2 а. Его эффективная длительность по порядку составляет  $T \cong 4 - 6 \text{ с}$ .

Нетрудно предположить, что среди физических механизмов генерации шума будут преобладать те, что сопутствуют работе мотора и силовой передачи. Однако возможно влияние физических механизмов и другой природы, например, за счет взаимодействия ходовой части с дорожным покрытием, или за счет аэродинамических воздушных вихрей, окружающих движущееся авто. На это указывает присутствие распределенной компоненты в спектре акустического шума, представленного на рис.2 б, в, создаваемого проезжающим автомобилем, которая вносит заметный вклад в интегральный уровень шума. Вместе с тем, в спектральном составе, кроме распределенной компоненты, присутствуют дискретные компоненты, свидетельствующие о заметной роли выхлопа двигателя – акустического источника со строго периодическим воздействием на среду. Резонансы конструкции могут «подчеркивать» некоторые дискретные компоненты спектра шума выхлопа, а другие могут маскировать шум. Нельзя исключить, что их влияние на излучение шума в направлении по ходу движения автомобиля относительно противоположного будет различным. Указанное различие усиливается за счет эффекта Доплера, в чем можно убедиться, рассматривая и сравнивая спектры на рис.2 б и рис.2 в, где за счет движения источника доплеровское смещение частот проявляется наиболее явно именно у дискретных компонент. На рис.2 б демонстрируется спектр акустического сигнала, взятый по той части реализации, которая соответствует приближению автомобиля к точке траверза от момента превышения полезного сигнала над фоном и до момента достижения максимума в точке траверза. Присутствующая в спектре шума дискретная компонента, преобладающая по уровню, (см. рис.2 б) соответствует частоте

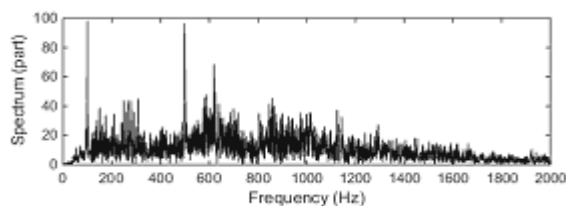
$$f_1' \approx 123 \text{ Гц}$$

и представляет собой первую гармонику тактового ряда в спектре выхлопного шума двигателя. Оценки, учитывающие доплеровское смещение, т.е. полученные пересчетом к системе, связанной с источником – автомобилем, показывают, что истинное значение ее частоты составляет  $\tilde{f}_1 \approx 115 \text{ Гц}$ .

На рис.2 в показан спектр акустического шума в той части реализации, которая соответствует удалению автомобиля после прохода им траверза, причем уровень шума падает от максимального до уровня фона. Имеет место «погружение» в акустический шум, порождаемый таким физическим источником как аэродинамические вихри, окружающие движущееся авто. По-прежнему на этом участке движения в спектре шума присутствует дискретная компонента, но уже на частоте  $f_1'' \approx 107 \text{ Гц}$ , а в отличие от предыдущего присутствуют и две более высокочастотные дискретные компоненты,



б



6

Рис.2.

а) осциллограмма акустического шума легкового автомобиля, быстро движущегося по шоссе,

б) спектрограмма акустического шума при движении автомобиля по шоссе – приближение к траверзу,

в) спектрограмма шума при удалении от траверза,

движение справа-налево,  $V = 80 \text{ км/час}$ . По оси ординат используется масштаб относительных единиц.

которые, вероятно, также принадлежат к моторному ряду  $f_4 \approx 491 \text{ Гц}$ ,  $f_5 \approx 614 \text{ Гц}$ , причем первая из них соответствует основной частоте выхлопа двигателя. Но именно компонента с  $f_1' \approx 123 \text{ Гц}$  и  $f_1'' \approx 107 \text{ Гц}$  в спектрах сигнала, регистрируемого перед достижением траверза, а затем после его прохода, позволяет с использованием соотношения  $V = c \Delta f / \tilde{f}_1$  ( $\Delta f = f_1' - f_1'' / 2$ ,  $\tilde{f}_1 = f_1' + f_1'' / 2$ ) оценить скорость движения объекта  $V$ . Учитывая  $\Delta f \approx 7.8 \text{ Гц}$ ,  $\tilde{f}_1 \approx 115 \text{ Гц}$ , получаем  $V \approx 23 \text{ м/с} = 82.8 \text{ км/час}$ , что удовлетворительно соответствует скорости движения, реализуемой в опыте. Изложенные оценки свидетельствуют о возможности удаленного контроля скорости движения путем тонкого спектрального анализа дискретных компонент внешнего акустического шума автомобиля.

Для исследования возможности пеленга автомобиля, движущегося по шоссе, построены веерные диаграммы углового распределения интенсивности шума, для чего проведена специальная обработка реализаций шума, зарегистрированных микрофонами продольной антенны. На рис.3 а, б, в, г, д представлены иллюстрации указанных веерных диаграмм, максимум центрального лепестка которых показывает текущее направление на объект для нескольких реализаций, соответствующих его движению сначала по одну сторону от траверза, а затем по другую, причем относительно линии траверза оказываются охваченными углы  $-30^\circ \dots +30^\circ$ . На углах вне этого сектора уровень полезного сигнала сравнивается с уровнем фона или становится ниже него. При анализе вся пятисекундная выборка (полная длительность реализации  $T = 5 \text{ с}$ ) шума разбивается на  $N = 10$  элементарных интервалов (конец одного совпадает с началом другого), так что каждый  $n$ -й элементарный интервал времени составляет  $\sim 0.5 \text{ с}$ . Веерные диаграммы построены для вышеуказанных элементарных временных интервалов путем применения стандартного алгоритма

сканирования центрального лепестка диаграммы направленности приемной антенны. Алгоритм основан на прибавке к фазе каждой спектральной компоненты Фурье-разложения сигнала, принятого любым элементом антенны, фазового набег, определяемого межэлементным расстоянием в решетке и соответствующего некоторому значению угла сканирования максимума центрального лепестка характеристики направленности решетки [7]. Известно, что сканирование характеристики предполагает использование антенны с так называемой «хорошо развитой апертурой» [8]. В такой антенне уровень боковых лепестков относительно центрального лепестка достаточно низкий, а его угловая ширина мала. При этом должны выполняться условия  $L \gg \lambda$ ,  $d \leq \lambda/4$ , где  $L$  – длина апертуры,  $\lambda$  – средняя в полосе длина волны,  $d$  – шаг расстановки микрофонов в решетке.

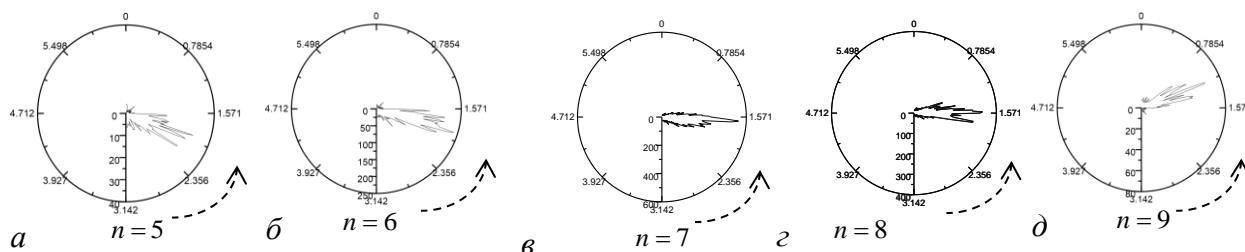


Рис.3.

Веерные диаграммы – угловые зависимости уровня акустического отклика, порождаемого движущимся автомобилем, с выхода продольной одноплечей антенны для нескольких текущих моментов времени ( $n$  – номер интервала):  $a$  –  $n=5$ ,  $b$  –  $n=6$ ,  $в$  –  $n=7$  (траверз),  $г$  –  $n=8$ ,  $д$  –  $n=9$ .

$\langle p^2 \rangle$  – как функция полярных координат. Стрелка указывает направление движения автомобиля.

Апертура применяемой в эксперименте 32 элементной антенны в длину составляет  $L=3.1$  м, т.е. на порядок превышает длину волны  $\lambda=0.34$  м (среднюю в полосе  $\Delta F=2$  кГц), а шаг дискретной расстановки приемников в апертуре  $d=0.1$  м более чем втрое меньше длины волны. С учетом того, что перечисленные параметры удовлетворяют записанным выше неравенствам, можно заключить, что используемая приемная антенна имеет хорошо развитую апертуру.

Из рис.3  $a, б, в, г, д$  нетрудно видеть, что сложный по форме лепесток веерной диаграммы, который лежит в интервале азимутальных углов относительно линии траверза  $-30^\circ \dots +30^\circ$ , меняет угловую ориентацию своего максимума по мере прохождения автомобилем пункта приема, как бы отслеживая направление линии, идущей на объект от пункта приема. Это свидетельствует о возможности решения задачи целеуказания (направление по углу азимута) методом построения веерных диаграмм, т.е. получения текущих данных пеленга транспортного объекта, движущегося по шоссе. Таким образом, демонстрируется принципиальная возможность контроля за текущим угловым положением луча, направленного от центра антенны на транспортный объект, а при известном удалении и за его линейной координатой, характеризующей абсолютное местоположение.

При анализе результатов регистрации также реализована взаимно-корреляционная обработка акустических шумовых сигналов автомобиля, по аналогии с тем, что было выполнено ранее применительно к другим видам транспортных средств [7].

На рис.4 в качестве иллюстрации представлены функции взаимной корреляции для первых четырех пар сигналов, соответствующих каналам 1-1, 1-2, 1-3, 1-4. Видно, что для всех функций взаимной корреляции имеется относительная задержка  $\tau_{n=1} (k=1..4)$  во



**Рис.4.**

Характерный вид функции автокорреляции (1-1). На вставке: для некоторого произвольного интервала времени представлены взаимно-корреляционные функции откликов четырех пар 1) 1-1, 2) 1-2, 3) 1-3, 4) 1-4 последовательно нумеруемых каналов антенны на масштабе временной развертки  $0-0.01$  с.

1) ——— 2) — — - 3) - · - · - · 4) ······

времени возникновения максимума корреляционных откликов. При этом  $k=1..K=32$  нумерует микрофоны и соответствующие приемные каналы в антенне. Пики взаимно-корреляционной функции шума на указанных участках соответствуют все более разнесенным каналам антенной решетки, причем за опорный принимается первый канал  $k=1$ , а пары образуются первым и вторым каналами, первым и третьим, первым и четвертым (1-1, 1-2, 1-3, 1-4, ... 1-k, ... 1-K) и т.д.

Набор таких взаимно-корреляционных функций, а точнее, графиков зависимости времени задержки их максимумов, отвечающих всей совокупности  $N$  – реализаций полной длительности  $T$ , можно использовать как основу для оценки скорости движения, направления движения и момента прохождения автомобилем линии траверза.

На рис. 5 а, б, в, г, д, е представлен набор зависимостей времени задержки  $\tau_n(k)$  корреляционных максимумов шума автомобиля от номера пары микрофонов в решетке. Легко видеть, что наклон линейной зависимости  $\tau_n(k)$  в случае рис. 5 а, б, в положителен, а на рис. 5 г, д, е он отрицателен. При переходе от участка  $n=5$  (рис.5 в) к участку  $n=6$  (рис.5 г) происходит резкая смена наклона графиков зависимости времени задержки  $\tau_n(k)$  от номера  $k$  микрофонного датчика с положительных углов к отрицательным. Это свидетельствует о проходе автомобилем линии траверза на значительной скорости, при которой разбиение всей реализации длительностью  $T=5$  с на  $N=10$  участков является недостаточно подробным, чтобы горизонтальный участок – с нулевым наклоном занял полный интервал в



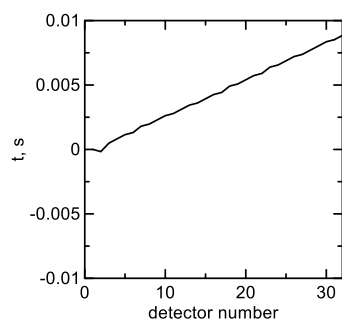
представленном на рис.5 ряду зависимостей. При более низких скоростях движения, исследованных ранее, масштаб разбиения на интервалы  $\sim 0.5 c$  оказывается достаточно подробным и обеспечивает присутствие горизонтального участка в наборе зависимостей  $\tau_n(k)$ , которое обозначает момент прохода траверсной линии.

Располагая два одинаковых плеча продольной антенны вдоль трассы на некотором расстоянии между ними, нетрудно получить две сдвинутые по времени многоканальные записи реализаций шума. По результатам взаимно-корреляционной обработки каждой из реализаций строятся соответствующие графики с резко разделяющимися отметками момента времени прохода траверсной линии каждой антенны. Это расширяет возможность дистанционной оценки скорости движения автомобиля с повышенной точностью. Кроме того, в зависимости от последовательности поступления указанных отметок прохода траверза каждой антенны обеспечивается надежное определение направления движения объекта.

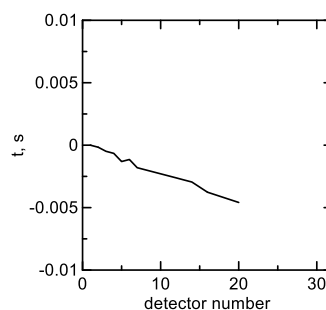
Представленные выше результаты демонстрируют возможность пеленга движущегося легкового автомобиля при размещении приемной антенны на удалении от трассы, не превышающем  $\sim 10$  метров. Возникает вопрос об оценке предельно возможной дистанции между трассой и пунктом приема (центром антенны), при которой пассивная локация движущегося легкового автомобиля по его собственному акустическому шуму потенциально реализуема. Интересуемая оценка может быть получена из рассмотрения характера спада интегрального уровня шума от проезжающего автомобиля, о котором можно судить по реализации, представленной на рис.2 а. Снижение уровня принимаемого шума (на каждом из

микрофонов в антенне) от максимума до уровня фона происходит на интервале  $\sim 5 c$ , в течение которого автомобиль проходит расстояние  $\leq 100 m$ . Следовательно, максимально допустимым удалением точки приема от трассы, при котором возможна надежная регистрация шума движущегося легкового автомобиля (с использованием микрофонов данного типа), следует считать дистанцию порядка  $\sim 20...30 m$ .

С целью получения данных о текущем местоположении транспортного средства и о параметрах его движения также проведены аналогичные исследования техногенных сейсмических колебаний, порождаемых движущимся по шоссе легковым автомобилем и регистрируемых кривой сейсмоприемников [9]. В этой связи представляет интерес в дальнейшем получить сравнительные оценки по параметрам достигаемой точности с описанием всех возможностей контроля движения транспортных объектов при использовании как акустических, так и сейсмических сигналов.



а



б

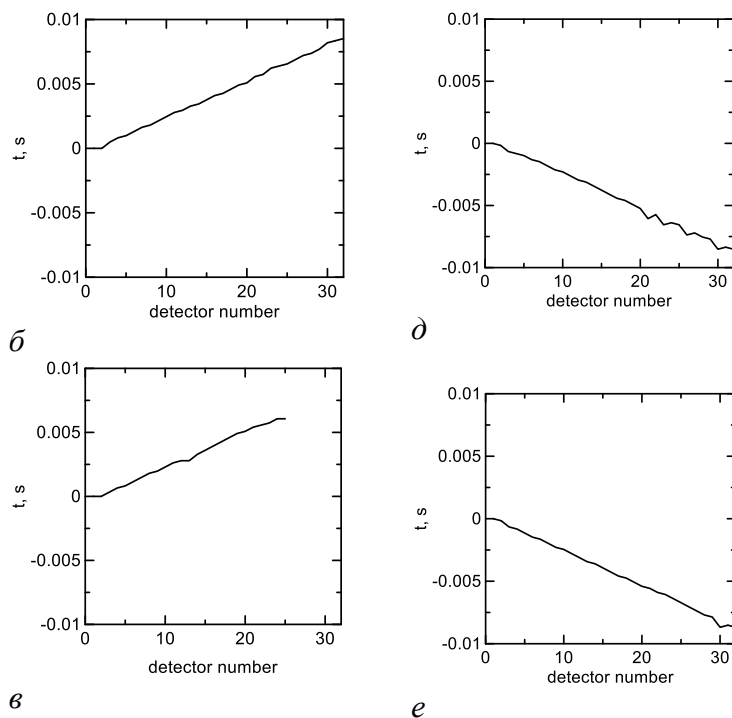


Рис.5. а, б, в, г, д, е

Зависимость времени задержки  $\tau_n(k)$  корреляционного максимума шума автомобиля от номера пары микрофонов в решетке на разных участках полной реализации.

а)  $n=3$ , б)  $n=4$ , в)  $n=5$ , г)  $n=6$ , д)  $n=7$ , е)  $n=8$

Траверз соответствует моменту между интервалами  $n=5$  и  $n=6$ .

### Список литературы

1. Proceedings of European Conference on Noise. Netherland. Maasterichts. 2015.
2. До-Хуонг Ким, Юнгджин Пак «Система для определения положения движущегося источника звука» Электронный журнал «Техническая акустика» 2006, 11.
3. В.И. Волчихин, В.А. Дудкин, А.А. Панков Об использовании комбинирования акустических и сейсмических принципов обнаружения наземных объектов. Пензенский государственный университет. г. Пенза.
4. Г.Ф. Седухина Проблемы локации источника сейсмических волн с помощью малой сейсмической группы. ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск. 2010. 154.
5. С.В. Бибииков, А.В. Шапарь Движущийся поезд как источник звуковых волн, распространяющихся по рельсовому пути. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012, № 5 (81)
6. Н.В. Мясникова, М.П. Берестень, В.А. Дудкин Экспресс-анализ сейсмических сигналов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника. № 4, 2007, 144-151.
7. Ю.М. Заславский, В.Ю. Заславский, А.М. Соков О применении сканируемой воздушно-акустической антенны для пеленга городского транспорта. Труды 15 Школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана». М.: 2016. с.119-123.



8. Т.В. Ермолаев, М.А. Флакман Курс антенные решетки. ННГУ, Н.Новгород, 2007.
9. Ю.М. Заславский, В.Ю. Заславский Сейсмические колебания, создаваемые легковым автомобилем, движущимся по шоссе. Вестник научно-технического развития. 2016, №10(110).

*Дата поступления статьи: 18 декабря 2016 года.*