

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 534.23; 534.4

ДОПЛЕРОВСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ДВИЖУЩИХСЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С.Р. ГЕЙСТЕР¹, А.М. ГЛАДЫШЕВ², А.С. ГЕЙСТЕР², А.М. ДЖЕКИ²

¹НИИ Вооруженных Сил Республики Беларусь
Калиновского, 4, Минск, 220103, Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 21 декабря 2009

Рассматривается эффект Доплера при приеме акустического сигнала, формируемого двигательной установкой автотранспортного средства (АТрС). Проводится анализ влияния перемещения АТрС и ветра на временную и спектральную структуры сигнала, формируемого двигателем АТрС. Эффект Доплера может быть использован для оценки скорости движения АТрС и должен учитываться при обработке акустического сигнала.

Ключевые слова: акустический сигнал, автомобиль, эффект Доплера.

Введение

При работе двигателя АТрС формируется акустический сигнал выхлопов отработавших газов [1]. Сигналы выхлопов представляют собой периодическую последовательность импульсов звукового давления (далее — акустические импульсы), период следования которых на выходе глушителя обозначим как T_{vh-0} . Полагаем, что акустические сигналы АТрС принимаются акустическим приемником, расположенным непосредственно на прямой линии перемещения АТрС.

В случае, когда АТрС является неподвижным, акустические импульсы принимаются приемником с периодом T_{vh-0} их излучения. Если же АТрС со скоростью V_t приближается к приемнику (рис. 1) или удаляется от него, то период следования акустических импульсов, принятых приемником, будет отличаться от исходного периода T_{vh-0} формирования сигналов в АТрС. Заметим, что на рис. 1 положение АТрС в момент излучения первого акустического импульса обозначено темным тоном, а положение АТрС в момент формирования второго импульса — светлым тоном. Это явление, имеющее место в пассивной акустической локации АТрС, связано с эффектом Доплера. Так как акустический сигнал двигателя АТрС не является гармоническим и представляет собой импульсы [2] звукового давления, то эффект Доплера в данном случае проявляется в изменении периода повторения импульсов на выходе приемника.

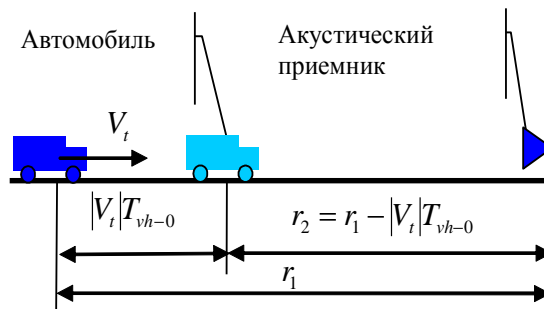


Рис. 1. Прием сигналов при приближении АТрС к акустическому приемнику

При построении систем, обеспечивающих обнаружение и измерение скорости движения АТрС по акустическому сигналу, необходимо знать характер изменения спектрально-временной структуры акустического сигнала перемещающегося АТрС и влияние ветра на эти изменения.

Доплеровская частота акустического сигнала двигателя АТрС

Вначале будем полагать, что АТрС перемещается равномерно со скоростью V_t по прямой линии, на которой расположен акустический приемник.

При приближении АТрС к акустическому приемнику прием сигналов иллюстрируется рис. 1. Полагаем момент излучения в АТрС первого анализируемого импульса началом временного отсчета. В этот момент расстояние между АТрС и приемником обозначим как r_1 . С учетом установленного начала временного отсчета первый импульс будет принят акустическим приемником в момент времени $t_1 = r_1 / c$, где c — скорость распространения звука в воздухе. Последующий (второй) анализируемый импульс будет сформирован в АТрС через интервал, равный периоду T_{vh-0} , и в момент времени $t_2 = T_{vh-0} + r_2 / c$ будет принят приемником. С учетом того, что $r_2 = r_1 - |V_t| T_{vh-0}$, период следования акустических импульсов выхлопов, формируемых приближающимся АТрС, на выходе приемника определяется выражением:

$$T_{vh-pr} = t_2 - t_1 = T_{vh-0} \left(1 - \frac{|V_t|}{c} \right). \quad (1)$$

Соответственно, частота следования принятых акустических импульсов, сформированных приближающимся АТрС, определяется выражением:

$$F_{vh-pr} = F_{vh-0} \frac{1}{1 - |V_t|/c} = F_{vh-0} \frac{c}{c - |V_t|}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что перемещение АТрС в сторону приемника приводит к увеличению частоты следования принятых импульсов выхлопов, формируемых двигателем АТрС. С учетом (2) выражение для доплеровской частоты, определяемой как изменение частоты сигнала, принятого приемником, по отношению к частоте сигнала, формируемого двигателем АТрС, имеет вид:

$$F_{d0-pr} = F_{vh-pr} - F_{vh-0} = F_{vh-0} \frac{|V_t|}{c - |V_t|}. \quad (3)$$

При удалении АТрС от акустического приемника подход к анализу временных интервалов остается аналогичным. С учетом этого второй анализируемый импульс, сформированный двигателем АТрС, будет принят приемником в момент времени $t_2 = T_{vh-0} + r_2 / c$, причем $r_2 = r_1 + |V_t| T_{vh-0}$. Период и частота следования принятых акустических импульсов, созданных удаляющимся АТрС, определяются выражениями:

$$T_{vh-ud} = t_2 - t_1 = T_{vh-0} \left(1 + \frac{|V_t|}{c} \right). \quad (4)$$

$$F_{vh-ud} = F_{vh-0} \frac{1}{1 + |V_t|/c} = F_{vh-0} \frac{c}{c + |V_t|}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что удаление АТрС от приемника приводит к уменьшению частоты следования принятых импульсов выхлопов газов двигателя, и доплеровская частота сигнала на выходе акустического приемника имеет вид:

$$F_{d0-ud} = F_{vh-ud} - F_{vh-0} = F_{vh-0} \left(\frac{c}{c + |V_t|} - 1 \right) = -F_{vh-0} \frac{|V_t|}{c + |V_t|}. \quad (6)$$

Рассмотрим **некоторые обобщения в отношении доплеровской частоты акустического сигнала** двигателя АТрС. *Во-первых*, в случае, когда скорость объекта значительно меньше скорости распространения звука, то есть $|V_t| \ll c$, выражения (3) и (6) для доплеровской частоты приобретают вид, известный из радиолокации [3, 4]: при приближении

$$F_{d0-pr} \cong F_{vh-0} \frac{|V_t|}{c}, \text{ а при удалении } F_{d0-ud} \cong -F_{vh-0} \frac{|V_t|}{c}.$$

Во-вторых, в основе доплеровского эффекта лежит изменение расстояния между АТрС и приемником, которое в случае равномерного и прямолинейного движения АТрС представляется как $r(t) = r_1 + V_t t$, где r_1 — расстояние в момент начала наблюдения при $t = 0$, а V_t — скорость, которая *при приближении АТрС к приемнику имеет отрицательный знак, а при удалении — положительный*. С учетом этого выражения (3) и (6) преобразуются к одинаковому виду:

$$F_{d0-pr(ud)} = F_{vh-0} \left(\frac{c}{c + V_t} - 1 \right) = -F_{vh-0} \frac{V_t}{c + V_t}. \quad (7)$$

В-третьих, если приемник находится вне линии движения АТрС, необходимо оперировать значением радиальной скорости, и выражение (7) преобразуется к виду:

$$F_{d0-pr(ud)} = -F_{vh-0} \frac{V_{r-t}}{c + V_{r-t}}, \quad (8)$$

где V_{r-t} — радиальная скорость перемещения АТрС относительно приемника, которая при приближении имеет отрицательный знак, а при удалении — положительный.

Свойства последовательности акустических импульсов с учетом эффекта Доплера

Полученные результаты позволяют выявить некоторые свойства последовательности акустических импульсов, формируемых двигателем АТрС, с учетом эффекта Доплера.

Первое свойство. Сигнал выпуска отработавших газов из двигателя является последовательностью видеоимпульсов, поэтому автокорреляционная функция и спектр этого сигнала имеют гребенчатые структуры [2]. Так как при движении АТрС относительно приемника происходит изменение периода повторения принятых импульсов, то *в спектральной области эффект Доплера проявляется в одновременном изменении частот гармонических составляющих принятого сигнала на величины, равные произведению доплеровской частоты на номер гармоники*.

Поясним это с использованием математической модели временной структуры акустического сигнала автомобиля, приведенной в [2]. Если АТрС является неподвижным, то спектр сигнала, принятого приемником, является дискретным:

$$S_{dv}(\omega) = S_{cl}(\omega) S_N(\omega T_{vh-0}), \quad (9)$$

где $S_{cl}(\omega)$ — энергетический спектр акустического сигнала одного рабочего цикла цилиндра; $S_N(\omega T_{vh-0})$ — энергетический спектр ограниченной последовательности δ -модулированных импульсов $p_\delta(t) = \sum_{n=1}^N \delta(t - (n-1)T_{vh-0})$.

На рис. 2,а представлен энергетический спектр акустического сигнала двигателя неподвижного АТрС. Спектральные компоненты для неподвижного АТрС следуют с интервалом, соответствующим частоте повторения выхлопов отработавших газов F_{vh-0} .

Если АТрС движется, то спектр сигнала на выходе приемника $S_{dv}(\omega) = S_{cl}(\omega)S_N(\omega T_{vh-pr}(ud))$ также является дискретным, но спектральные компоненты в нем следуют с интервалом, кратным значению $F_{vh-pr}(ud) = (F_{vh-0} + F_{d0-pr}(ud))$, рис. 2,б.

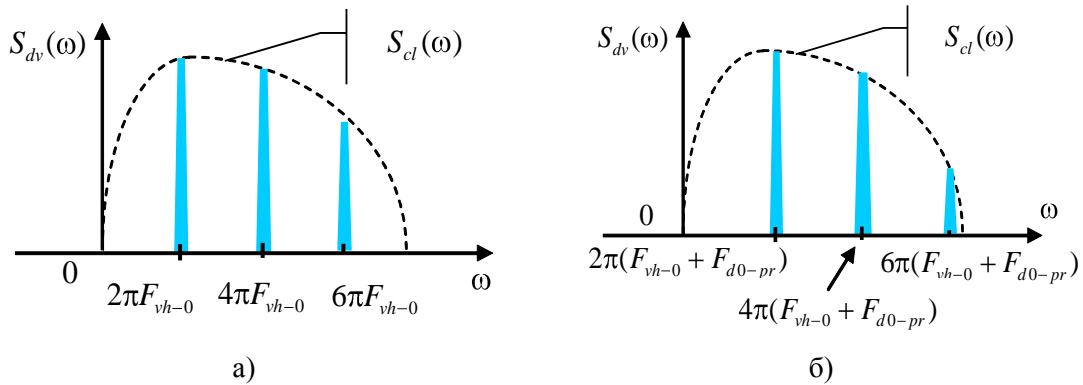


Рис. 2. Энергетический спектр акустического сигнала двигателя:
а — неподвижного АТрС; б — движущегося АТрС

Второе свойство. В соответствии с выражениями (3), (6) и (8) значения модулей доплеровских частот сигналов, принятых акустическим приемником при приближении и удалении АТрС с одинаковыми по модулю скоростями, будут разными. Например, при перемещении АТрС, двигатель которого формирует акустические импульсы с частотой $F_{vh-0} = 100$ Гц, относительно приемника со скоростью $V_r = 20$ м/с и скорости звука $c = 340$ м/с, доплеровские частоты будут иметь значения: при приближении АТрС к приемнику $F_{d0-pr} = 6,25$ Гц, а при удалении от приемника $F_{d0-ud} = -5,55$ Гц.

Доплеровская частота акустического сигнала двигателя АТрС при наличии ветра

Рассмотрим типовой случай, когда скорость ветра V_v существенно меньше скорости распространения звука, то есть $V_v \ll c$. Кроме того, будем полагать, что ветер имеет постоянную скорость V_v на интервале наблюдения, а его вектор лежит на линии перемещения АТрС (рис. 3).

При приближении АТрС к акустическому приемнику (рис. 3) первый анализируемый импульс придет к приемнику в момент времени t_1 , который определяется параметрами ветра: если ветер направлен к приемнику, то $t_1 = \frac{r_1}{c + |V_v|}$, а если от приемника, то $t_1 = \frac{r_1}{c - |V_v|}$.

Второй анализируемый импульс, сформированный двигателем АТрС, будет принят приемником в момент времени t_2 , причем:

$$\text{если ветер направлен к приемнику, то } t_2 = T_{vh-0} + \frac{r_2}{c + |V_v|} = T_{vh-0} + \frac{r_1 - |V_v| T_{vh-0}}{c + |V_v|};$$

если ветер направлен от приемника, то $t_2 = T_{vh-0} + \frac{r_2}{c - |V_v|} = T_{vh-0} + \frac{r_1 - |V_t| T_{vh-0}}{c - |V_v|}$.

В итоге период следования акустических импульсов выхлопов газов от приближающегося АТрС на выходе приемника определяется выражениями:

если ветер направлен к приемнику, то $T_{vh-pr} = t_2 - t_1 = T_{vh-0} \frac{c + |V_v| - |V_t|}{c + |V_v|}$;

если ветер направлен от приемника, то $T_{vh-pr} = t_2 - t_1 = T_{vh-0} \frac{c - |V_v| - |V_t|}{c - |V_v|}$.

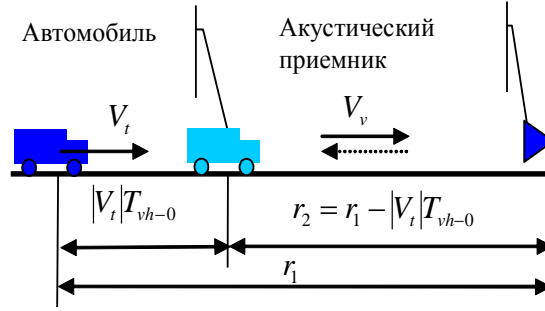


Рис. 3. Прием сигналов при приближении АТрС к приемнику в условиях ветра

Выражения для частоты следования принятых импульсов и доплеровской частоты при приближении АТрС имеют вид:

если ветер направлен к приемнику, то $F_{vh-pr} = F_{vh-0} \frac{c + |V_v|}{c + |V_v| - |V_t|}$ и

$$F_{d0-pr} = F_{vh-pr} - F_{vh-0} = F_{vh-0} \frac{|V_t|}{c + |V_v| - |V_t|}, \quad (10a)$$

если ветер направлен от приемника, то $F_{vh-pr} = F_{vh-0} \frac{c - |V_v|}{c - |V_v| - |V_t|}$ и

$$F_{d0-pr} = F_{vh-pr} - F_{vh-0} = F_{vh-0} \frac{|V_t|}{c - |V_v| - |V_t|}, \quad (10б)$$

При удалении АТрС от акустического приемника первый анализируемый импульс принимается приемником с задержкой t_1 , причем если ветер направлен к приемнику, то

$t_1 = \frac{r_1}{c + |V_v|}$, а если от приемника, то $t_1 = \frac{r_1}{c - |V_v|}$. Второй анализируемый импульс будет при-

нят в момент времени t_2 , причем если ветер направлен к приемнику, то $t_2 = T_{vh-0} + \frac{r_2}{c + |V_v|} =$

$= T_{vh-0} + \frac{r_1 + |V_t| T_{vh-0}}{c + |V_v|}$, а если от приемника, то $t_2 = T_{vh-0} + \frac{r_2}{c - |V_v|} = T_{vh-0} + \frac{r_1 - |V_t| T_{vh-0}}{c - |V_v|}$. Период

следования акустических импульсов выхлопов газов удаляющегося АТрС на выходе приемника определяется выражениями:

если ветер направлен к приемнику, то $T_{vh-ud} = t_2 - t_1 = T_{vh-0} \frac{c + |V_v| + |V_t|}{c + |V_v|}$;

если ветер направлен от приемника, то $T_{vh-ud} = t_2 - t_1 = T_{vh-0} \frac{c - |V_v| + |V_t|}{c - |V_v|}$.

Выражения для частоты следования принятых акустических импульсов, сформированных удаляющимся АТРС, и доплеровской частоты имеют вид:

если ветер направлен к приемнику, то $F_{vh-ud} = F_{vh-0} \frac{c + |V_v|}{c + |V_v| + |V_t|}$ и

$$F_{d0-ud} = F_{vh-ud} - F_{vh-0} = -F_{vh-0} \frac{|V_t|}{c + |V_v| + |V_t|}, \quad (11a)$$

если ветер направлен от приемника, то $F_{vh-ud} = F_{vh-0} \frac{c - |V_v|}{c - |V_v| + |V_t|}$ и

$$F_{d0-ud} = F_{vh-ud} - F_{vh-0} = -F_{vh-0} \frac{|V_t|}{c - |V_v| + |V_t|}, \quad (11б)$$

По аналогии с (7) и (8) найдем обобщенные выражения для частоты следования импульсов $F_{vh-pr(ud)}$ и доплеровской частоты $F_{d0-pr(ud)}$. Полагаем, что если проекция вектора ветра на линию, соединяющую АТРС и приемник, направлена к приемнику, то радиальная скорость ветра V_{r_v} принимается отрицательной, а для противоположного направления — положительной. Тогда выражения (10) и (11) преобразуются к виду:

$$F_{vh-pr(ud)} = F_{vh-0} \frac{c - V_{r_v}}{c - V_{r_v} + V_{r_t}}, \quad F_{d0-pr(ud)} = F_{vh-pr(ud)} - F_{vh-0} = -F_{vh-0} \frac{V_{r_t}}{c - V_{r_v} + V_{r_t}}.$$

Заключение

В заключение акцентируем внимание на особенностях проявления эффекта Доплера при приеме акустических сигналов, генерируемых АТРС. В литературе, например, [5], эффект Доплера рассматривается применительно к монохроматическому сигналу с частотой колебаний ω_0 . Аналогичные результаты получаются и для импульсного сигнала с несущей частотой ω_0 . В этих случаях эффект Доплера возникает из-за изменения начальных фаз временных дискретных отсчетов или начальных фаз импульсов на несущей частоте. При этом эффект Доплера в спектральной области проявляется следующим образом: спектр принятого сигнала представляет собой спектр сигнала от неподвижного объекта, смещенный на частоту Доплера. При этом внутренняя структура принятого сигнала не изменяется.

Акустический сигнал АТРС в отличие от рассмотренных выше сигналов представляет собой последовательность видеоимпульсов, не имеющих частотного заполнения ($\omega_0 = 0$). Для такой последовательности анализу подвергаются не изменения фаз принятых импульсов, отсутствующих в явном виде, а изменения периода следования принятых импульсов. Именно это и отличает разработанный подход к анализу эффекта Доплера при приеме акустических сигналов АТРС от классического подхода, изложенного в литературе.

DOPPLER EFFECT AT ACOUSTIC MONITORING OF MOVING VEHICLES

S.R. HEISTER, A.M. GLADYSHEV, A.S. HEISTER, A.M. JACKIE

Abstract

Doppler Effect at receiving of an acoustic signal from vehicle engine is considered. The analysis of influence of moving of a vehicle and a wind on time and spectral structures of an acoustical signal formed by vehicle engine is carried out. The Doppler Effect can be used for an estimation of speed of movement of a vehicle and should be taken into account at processing of an acoustic signal.

Литература

1. Луканин В.Н., Гудцов В.Н., Бочаров Н.Ф. Снижение шума автомобиля. М., 1981.
2. Гейстер С.Р., Гладышев А.М. // Докл. БГУИР. 2009. № 3. С.17–25.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. Т. 1. Основы радиолокации / Пер. с англ. под ред. Я.С. Иццоки. М., 1976.
4. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации. М., 1983.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика. М., 1986.