

УДК 621.396.96

Л.М. Краснов, канд. техн. наук

Севастопольский военно-морской институт

ул. Дыбенко 1а, г. Севастополь, Украина, 99035

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ИСТОЧНИКА ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Рассматривается методика определения параметров амплитудно-частотной модуляции радиолокационного колебания при отражении его от источника звуковых волн. Приведены механическая и электродинамическая модели звукового поршня при облучении его непрерывным монохроматическим колебанием. Получена формула зависимости амплитуды и доплеровского сдвига отраженного радиолокационного сигнала от геометрических размеров звукового поршня, а также от частоты и амплитуды его звуковых колебаний.

В последнее время вопросы измерения акустических характеристик источников звуковых колебаний приобретают особый интерес.

Как известно, при экспериментальном исследовании звукового давления, развиваемого головкой громкоговорителя, измерения обычно выполняют в заглушенной камере. Это вызвано необходимостью ослабления влияния посторонних источников звука на результаты измерений. Однако заглушенная камера является весьма дорогостоящим устройством. В то же время информация о характеристиках колебания диффузора звуковой головки может содержаться в отраженном от него радиолокационном сигнале [1–3]. Основное достоинство радиолокационного метода заключается в том, что необходимость использования заглушенной камеры отпадает, так как посторонние источники звука не оказывают влияния на параметры колебания диффузора испытуемой головки. Радиолокационный метод измерения акустических характеристик излучателей в литературе не описан. Поэтому вопросы разработки математической модели радиолокационного сигнала, отраженного от источника звуковых колебаний актуальны и представляют теоретический и практический интерес.

С целью упрощения анализа процесса формирования вторичного радиолокационного излучения рассмотрим математическую модель радиолокационного сигнала, отраженного от звукового источника, излучающего плоскую волну. Плоская волна образуется источником звука, линейные размеры которого велики по сравнению с длиной излучаемой им волны, или, если зона поля находится на достаточно большом расстоянии (по сравнению с длиной волны) от источника звука. Классическим примером плоской волны считают колебания, возбуждаемые жестким поршнем в длинной трубе, если диаметр поршня намного больше длин волн излучаемых колеба-

ний (рисунок 1). Поверхность фронта волны в трубе не меняется по мере её распространения.

Известно, что связь между колебательной скоростью $v_{зв}$ и звуковым давлением $p_{зв}$ может быть представлена в виде уравнения движения среды

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{dp_{зв}}{dr} = \frac{dv_{зв}}{dt} \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность воздуха; r – направление распространения звуковой волны.

Из (1) следует

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{dp_{зв}}{dr} dr \quad (2)$$

Если излучатель колеблется по гармоническому закону с круговой частотой Ω , то давление, развиваемое у его поверхности, равно

$$p_{зв} = p_{звм} e^{i\Omega t}$$

На расстоянии r от излучателя звуковое давление

$$p_{зв} = p_{звм} e^{i\Omega(t-\tau)} \quad (3)$$

где $\tau = r/c_{зв}$ – время пробега звуковой волны от излучателя до точки, находящейся на расстоянии r .

Выражение (3) можно представить в виде

$$p_{зв} = p_{звм} e^{i(\Omega t - kr)} \quad (4)$$

где $k = \Omega/c_{зв}$ – волновое число звукового поля.

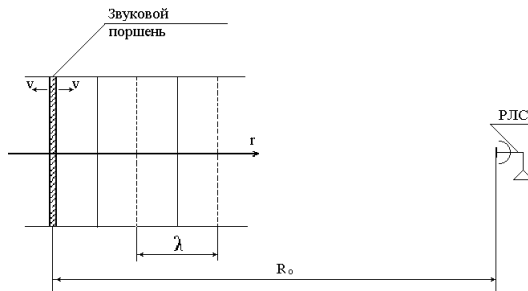


Рисунок 1 – Пояснение процесса рассеяния электромагнитной энергии на звуковом поршне

Произведение kr определяет фазовый сдвиг колебания в точке, находящейся на расстоянии r от излучателя.

Подставляя (4) в уравнение движения среды (2), получаем выражение скорости колебаний

$$v = i \frac{k p_{36m}}{\rho_0} \int e^{i(\Omega t - kr)} dt = v_m e^{i(\Omega t - kr)},$$

где

$$v_m = p_{36m} / \rho_0 c_{36} \text{ или } v = p_{36} / \rho_0 c_{36}. \quad (5)$$

Произведение $\rho_0 c_{36} = Z_a = p_{36} / v$ называют удельным акустическим сопротивлением среды. Для нормального атмосферного давления и температуры 20°C удельное акустическое сопротивление воздуха $Z_a = \rho_0 c_{36} = 413 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$.

Таким образом, зная колебательную скорость поршня, можно с помощью (5) определить звуковое давление в воздухе в непосредственной близости от поршня.

В случае гармонического колебания

$$U_{cm} = U_m \sin \Omega t \quad (6)$$

колебательная скорость равна

$$v = \frac{dU_{cm}}{dt} = U_m \Omega \cos \Omega t, \quad (7)$$

откуда можно найти смещение частиц воздуха и поршня

$$U_m = \frac{v_m}{\Omega}. \quad (8)$$

Аналогичные результаты легко могут быть получены для источника акустических волн со сферическим фронтом.

При построении электродинамической модели звукового поршня полагаем, что труба, формирующая плоский фронт звуковой волны, сделана из радиопрозрачного материала, и поршень облучается монохроматической плоской электромагнитной волной

$$\vec{H}_i = \vec{H}_o \exp(i\omega_0 t), \quad (9)$$

где ω_0 – несущая частота; $\vec{H}_0$ – постоянный магнитный вектор.

Отраженный сигнал при распространении до поршня и обратно можно представить как

$$\vec{H}_i = \vec{H}_o \sqrt{\sigma_{36}} \exp i \{ \omega_0 t - 2k_1 [R_0 - U_{cm}(t)] \}, \quad (10)$$

где $\sigma_{36}^{\text{эв}}$ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) поршня; R_0 – расстояние от РЛС до поршня; $U_{cm}^{\text{см}}(t)$ – колебательное смещение поршня; $k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны зондирующего радиолокационного сигнала.

Текущая частота отраженного сигнала по определению равна производной изменения его фазы

$$\omega_{om p} = \frac{d}{dt} \left\{ \omega_0 t - 2k_1 [R_0 - U_{cm}(t)] \right\} = \omega_0 - 2k_1 \frac{dU_{cm}}{dt}. \quad (11)$$

Второй член в правой части (11) представляет собой текущий доплеровский сдвиг частоты отраженного сигнала

$$\omega_d(t) = 2k_1 \frac{dU_{cm}}{dt}. \quad (12)$$

С учетом (6) и (7) выражение (12) можно переписать в виде

$$\omega_d(t) = 2k_1 U_m \Omega \cos \Omega t, \quad (13)$$

откуда можно определить амплитудное значение доплеровского сдвига частоты отраженного радиолокационного сигнала

$$\omega_{dm} = 2k_1 U_m \Omega. \quad (14)$$

Таким образом, амплитуда доплеровского сдвига частоты радиолокационного отраженного сигнала прямо пропорциональна амплитуде и частоте звукового колебания поршня.

После подстановки (8) в (14), определяем связь амплитуды доплеровского сдвига частоты отраженного радиолокационного сигнала с амплитудой колебательной скорости поршня

$$\omega_{dm} = 2k_1 v_m. \quad (15)$$

Подставляя (5) в (15), находим зависимость амплитуды доплеровского сдвига частоты радиолокационного отраженного сигнала от звукового давления полоской звуковой волны, излучаемой поршнем

$$\omega_{dm} = 2k_1 p_{зм} / \rho_0 c_{зв} = 2k_1 p_{зм} / Z_a. \quad (16)$$

Из рассмотрения формул (14–16) следует, что измерив амплитуду доплеровского сдвига отраженного сигнала, можно определить все линейные параметры звукового поля, излучаемого звуковым поршнем:

$$\left. \begin{aligned} U_m &= \frac{\omega_{dm}}{2k_1 \Omega}; \\ v_m &= \frac{\omega_{dm}}{2k_1}; \\ p_{зм} &= \frac{\omega_{dm} Z_a}{2k_1} \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Таким образом, получены соотношения (17) для определения линейных характеристик звукового поля: колебательной скорости, амплитуды и звукового давления по результатам измерения амплитуды доплеровского

сдвига частоты радиолокационного сигнала, отраженного от источника звукового поля.

Результаты статьи будут использованы при разработке методики измерения линейных характеристик звукового поля с помощью когерентной радиолокационной станции непрерывного излучения, что составит предмет дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Викторов В.А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов/ В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 208 с.
2. Краснов Л.М. Решение обратной задачи рассеяния электромагнитной энергии на качающихся объектах / Л.М. Краснов // Вестник СевГТУ: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2000. — Вып. 26. — С. 41 – 46.
3. Хайкин С.Э. Физические основы механики/ С.Э Хайкин.—М.: Наука, 1971.—752 с.

Поступила в редакцию 22.03.2005 г.