

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ СРЕД НА ОТРАЖЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН ОТ ПОДВИЖНОЙ ГРАНИЦЫ

Глушченко А.Г.¹, Глушченко Е.П.¹, Иванов В.В.², Устинова Е.С.²

¹ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Самара, Россия (443090, Самара, Московское шоссе, 77), e-mail: gag646@yandex.ru

²ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», Тольятти, Россия, (445677, Тольятти, ул. Гагарина, 4), e-mail: gag@psati.ru

Рассмотрено влияние движения сред, примыкающих к границе раздела, на отражение и прохождение волн через подвижную границу раздела сред. Движение сред существенно меняет характер отражения от движущейся границы раздела сред, особенно в том случае, когда эти скорости сопоставимы по числовому значению. Установлено, что движение сред приводит к дополнительному (к доплеровскому) изменению частоты как отраженных, так и прошедших волн. Получены соотношения: для расчета частот отраженной и прошедшей волн, для расчета коэффициентов отражения и прохождения, которые обобщают известные формулы Доплера на случай подвижных границ и самих сред. Установлено, что подбором соотношения между скоростью движения границы раздела сред и скоростями движения сред можно добиться отсутствия отраженного сигнала.

Ключевые слова: движение сред, движение границы, отражение, преобразование частоты.

EFFECT OF THE MOVEMENT ENVIRONMENTS REFLECTION OF ELASTIC WAVES FROM MOBILE BOUNDARY

Glushchenko A.G.¹, Glushchenko E.P.¹, Ivanov V.V.², Ustinova E.S.²

¹ Povolzhskiy state University of telecommunications and Informatics, Samara, Russia, 443090, Samara, Moskovskoye shosse, 77), e-mail: gag646@yandex.ru

² Povolzhskiy state University of service, Togliatti, Russia, (445677, Togliatti, Gagarin street, 4), e-mail: gag@psati.ru

Considers the impact of the movement environments, adjacent to the boundary of the reflection and refraction of waves through mobile border section environments. Flow essentially changes the character of reflection from a moving boundary line, especially in the case when these speed comparable to a numerical value. Flow leads to an additional (to the Doppler) change in frequency of the reflected and passed the waves. Relationships are obtained: for the calculation of the frequency of the reflected and reaffirmed by the waves, for the calculation of the reflection and transmission coefficients, which generalize the well-known formula of Doppler effect for the case of moving borders and the media. Selection of speed of movement of media boundaries and velocity environments, you can achieve the absence of the reflected signal.

Keywords: movement media, movement boundary, reflection, frequency conversion.

Введение

Отражение различной природы волн от поверхностей тел широко используется для дистанционного и бесконтактного исследования параметров и физических свойств этих тел. При отражении волн от движущейся границы раздела сред наблюдается изменение частоты отраженной по отношению к падающей волне, известное как эффект Доплера, рассматривавшийся многими авторами [1-5], преимущественно, в геометрических моделях волнового процесса. Этот эффект нашел широкое применение, в частности, для дистанционного измерения направления и величины скорости движущихся объектов. Зависимости коэффициентов отражения и прохождения, изменение частот отраженного и прошедшего сигналов от скорости движения самих сред, не рассматривались [3,4]. Вместе

с тем, движение сред приводит к увлечению волнового процесса движущимися средами, как следствие, к невзаимности параметров сред для прямых и обратных волн и к существенному изменению физических свойств структур [5]. Рассмотрим здесь особенности отражения волн от подвижной границы раздела сред, каждая из которых может двигаться со своей скоростью.

Основные уравнения

Пусть плоская граница раздела двух сред движется со скоростью u вдоль координатной оси Ox (рис.1). Движение границы описывается уравнением: $x = ut$. Слева от границы расположена упругая среда с плотностью ρ_1 , характеризующаяся скоростью распространения упругих волн - c_1 , справа - среда с соответствующими параметрами ρ_2 , c_2 . Пусть обе граничащие среды также движутся вдоль оси Ox для общности со скоростями v_1 и v_2 соответственно. Тогда скорость распространения звуковых волн вдоль оси Ox в первой среде равна $c_{10} = c_1 + v_1$, в противоположном направлении в той же среде скорость равна $c_{1R} = c_1 - v_1$. Во второй среде с учетом условия на бесконечности волны распространяются вдоль оси Ox со скоростью $c_{2T} = c_2 + v_2$.

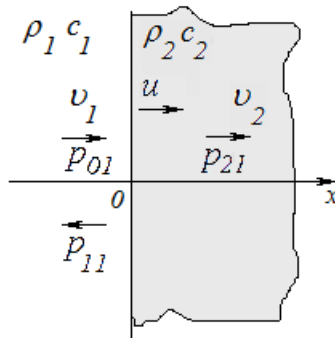


Рис.1. Отражение волн от подвижной границы раздела движущихся сред

Давление падающей волны представим в виде:

$$p_{10} = A_{10} \exp[i(\omega t - k_{10}x)] = A_{10} \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x}{c_{10}}\right)\right]. \quad (1)$$

При взаимодействии волны с границей раздела сред образуются отраженная волна:

$$p_{1R} = A_{1R} \exp[i(\omega_1 t + k_{1R}x)] = A_{1R} \exp\left[i\omega_1\left(t + \frac{x}{c_{1R}}\right)\right], \quad (2)$$

Прошедшая через границу раздела в другую среду волна описывается в виде:

$$p_{2T} = A_{2T} \exp[i(\omega_2 t - k_{2T} x)] = A_{1T} \exp\left[i\omega_2 \left(t - \frac{x}{c_{2T}}\right)\right]. \quad (3)$$

Здесь ω , ω_1 , ω_2 - частоты падающей, отраженной и прошедшей волн соответственно, k_{10} , k_{1R} , k_{1T} - волновые числа, A_{10} , A_{1R} , A_{1T} - амплитуды. Анализ граничных условий показывает: частоты отраженной ω_1 , и прошедшей через границу раздела сред ω_2 волн в общем случае отличаются от частоты ω падающей волны. Функции давления p_{10} , p_{1R} , p_{2T} удовлетворяют волновому уравнению, а также должны удовлетворять граничным условиям на подвижной границе раздела сред, которые имеют вид:

$$p_{10} + p_{1R} = p_{2T}, \quad (4)$$

$$v_{10x} + v_{1Rx} = v_{2Tx}. \quad (5)$$

Подстановка искоемых решений (1)-(3) в первое граничное условие (4) дает соотношение:

$$A_{10} \exp\left[i\omega t \left(1 - \frac{u}{c_{10}}\right)\right] + A_{1R} \exp\left[i\omega_1 t \left(1 + \frac{u}{c_{1R}}\right)\right] = A_{2T} \exp\left[i\omega_2 t \left(1 - \frac{u}{c_{2T}}\right)\right].$$

Это соотношения должны выполняться для любого момента времени t . Это можно обеспечить только при условии:

$$\omega \left(1 - \frac{u}{c_{10}}\right) = \omega_1 \left(1 + \frac{u}{c_{1R}}\right) = \omega_2 \left(1 - \frac{u}{c_{2T}}\right). \quad (6)$$

Отсюда частоты отраженной и прошедшей волн связаны с частотой падающей волны соотношениями:

$$\omega_1 = \omega \frac{\left(1 - \frac{u}{c_{10}}\right)}{\left(1 + \frac{u}{c_{1R}}\right)} = \frac{c_1 + v_1 - u}{c_1 + v_1} \frac{c_1 - v_1}{c_1 - v_1 + u} \omega, \quad \omega_2 = \omega \frac{\left(1 - \frac{u}{c_{10}}\right)}{\left(1 - \frac{u}{c_{2T}}\right)} = \frac{c_1 + v_1 - u}{c_1 + v_1} \frac{c_2 + v_2}{c_2 + v_2 - u} \omega. \quad (7)$$

На рис. 2 показана зависимость отношения частоты отраженной волны ω_1 к частоте падающей волны ω от относительной скорости движения границы раздела сред u/c_1 при различных относительных скоростях движения первой среды v_1/c_1 . Частота отраженной

волны совпадает с частотой падающей волны при неподвижной границе раздела сред $u/c_1 = 0$ и уменьшается до нуля при увеличении скорости границы до скорости волн в первой среде ($u \rightarrow c_1$) и мало зависит от параметра $v_1/c_1 \leq 0.4$ в области $u/c_1 > 0$. Однако, в диапазоне скоростей $0.6 \leq v_1/c_1 \leq 0.9$ наблюдается резонансный характер зависимости частоты отраженной волны. При этом с ростом v_1/c_1 интенсивное изменение частоты отраженной волны ω_1 наблюдается при меньших значениях скорости границы u/c_1 .

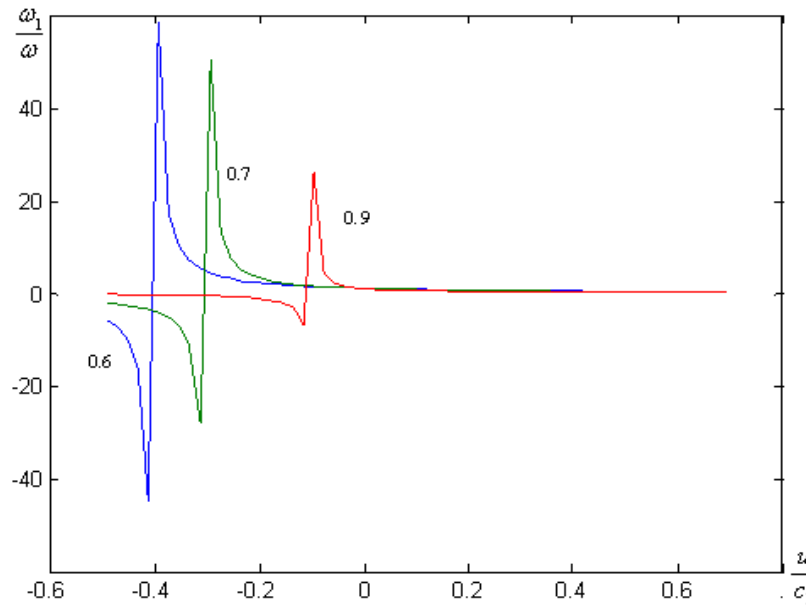


Рис.2. Зависимость относительной частоты отраженной волны ω_1/ω от скорости движения границы раздела сред u/c_1

В частном случае подвижной границы раздела и неподвижных сред из (7) имеем известные соотношения [1]:

$$\omega_1 = \frac{c_1 - u}{c_1 + u} \omega, \quad \omega_2 = \frac{c_2}{c_1} \frac{c_1 - u}{c_2 - u} \omega.$$

Характер зависимости частоты прошедших волн от скорости движения границы существенно зависит от отношения скоростей волн во второй и в первой средах c_2/c_1 . В интервале отрицательных (противоположное оси $0x$ движение) скоростей частота монотонно растет до значений скорости границы раздела $|u| \sim c_2$. При $u > c_2$ волновой процесс не догоняет границу раздела. На рис. 3 показана зависимость отношения частоты прошедшей волны ω_2 к частоте падающей волны ω от относительной скорости движения границы раздела сред u/c_1 при отношении скоростей волн в средах $c_2/c_1=0,8$.

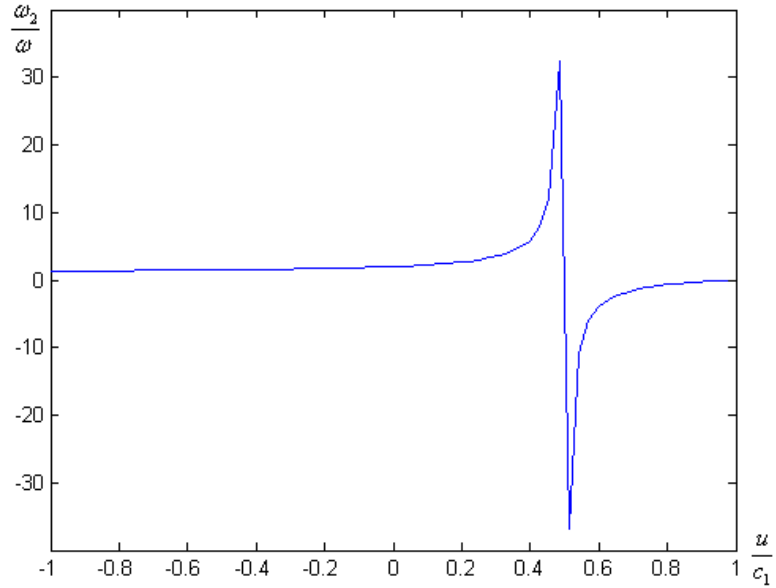


Рис.3. Зависимость относительной частоты отраженной волны ω_2/ω от скорости движения границы раздела сред u/c_1 при $c_2/c_1=0,8$

Таким образом, частоты отраженной и прошедшей волн отличаются от частоты ω , падающей на границу раздела сред волны и зависят как от скорости движения границы раздела сред u , так и от скоростей движения самих сред v_1 и v_2 .

Если граница движется в направлении распространения падающей волны (скорости u и c_{10} по направлению совпадают), то частота отраженного сигнала, как правило, меньше частоты падающей волны $\omega_1 < \omega$; если граница движется навстречу падающей волне (скорости u и c_{10} противоположны по направлению), то $\omega_1 > \omega$. Однако, при некоторых соотношениях параметров возможно обратное соотношение частот. Частота прошедшего сигнала может быть больше или меньше ω в зависимости от соотношения скоростей сигнала в первой и второй средах: c_{10}/c_{2T} . При $c_{10}/c_{2T} > 1$ и скорости движения границы, меньшей скоростей волн в обеих средах: $u < c_{10}, c_{2T}$ частота прошедшего сигнала $\omega_2 > \omega$.

Учет граничных условий (4), (5) при $x = ut$ дает систему уравнений для определения амплитуд отраженной A_{1R} и прошедшей A_{2T} волн через амплитуду падающей волны A_{10} :

$$A_{10} + A_{1R} = A_{2T},$$

$$-\frac{k_{10}}{\rho_1} A_{10} + \frac{k_{1R}}{\rho_1} A_{1R} = -\frac{k_{2T}}{\rho_2} A_{2T}.$$

Коэффициенты отражения и прохождения определяются выражениями:

$$R = \frac{A_{1R}}{A_{10}} = \frac{\rho_2 k_{10} - \rho_1 k_{2T}}{\rho_2 k_{1R} + \rho_1 k_{2T}}, \quad T = \frac{A_{2T}}{A_{10}} = \frac{\rho_2 (k_{1R} + k_{10})}{\rho_2 k_{1R} + \rho_1 k_{2T}} \quad (8)$$

или с учетом скоростей движения границы u и сред v_1 и v_2 :

$$R = \frac{\frac{\rho_2}{c_1 + v_1 - u} - \frac{\rho_1}{c_2 + v_2 - u}}{\frac{\rho_2}{c_1 - v_1 + u} + \frac{\rho_1}{c_2 + v_2 - u}}, \quad T = \frac{\frac{\rho_2}{c_1 + v_1 - u} + \frac{\rho_2}{c_1 - v_1 + u}}{\frac{\rho_2}{c_1 - v_1 + u} + \frac{\rho_1}{c_2 + v_2 - u}}. \quad (9)$$

Из (8) следует, что условие отсутствия отраженного сигнала ($R = 0$) приводит к соотношению:

$$\rho_2 k_{10} = \rho_1 k_{2T},$$

которое выполняется при скорости движения границы раздела сред равной:

$$u = \frac{\rho_2 (c_2 + v_2) - \rho_1 (c_1 + v_1)}{\rho_2 - \rho_1}.$$

Рассмотрим частные случаи, представляющие практический интерес.

- 1) Если $u = v_1 = v_2 = 0$, движение границы раздела сред и движение самих сред отсутствуют. Коэффициент отражения принимает известный вид [1]:

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}.$$

- 2) Если $u \neq 0$, $v_1 = v_2 = 0$, движется только граница раздела сред. Коэффициенты отражения и прохождения определяются выражениями:

$$R = \frac{\rho_2 (c_2 - u) - \rho_1 (c_1 - u)}{\rho_2 (c_2 - u) + \rho_1 (c_1 + u)}, \quad T = \frac{2\rho_2 c_1 (c_2 - u)(c_1 - u)^{-1}}{\rho_2 (c_2 - u) + \rho_1 (c_1 + u)}.$$

Коэффициент отражения $R = 0$, при скорости движения границы:

$$u = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 - \rho_1}.$$

- 3) Если $u = v_2 \neq 0$, $v_1 = 0$, то вторая среда движется совместно с границей раздела, а первая среда не движется, тогда

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 (c_1 - u)}{\rho_2 c_2 + \rho_1 (c_1 + u)} \frac{c_1 + u}{c_1 - u}, \quad T = \frac{\rho_2 \left(1 + \frac{c_1 + u}{c_1 - u}\right)}{\rho_2 + \rho_1 \frac{c_1 + u}{c_2}}.$$

Коэффициент отражения $R = 0$, при скорости движения границы равной

$$u = c_1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} c_2.$$

- 4) Если первая среда движется совместно с границей раздела $u = v_1 \neq 0$, вторая среда не движется $v_2 = 0$:

$$R = \frac{\rho_2(c_2 - u) - \rho_1 c_1}{\rho_2(c_2 - u) + \rho_1 c_1}, \quad T = \frac{2}{1 + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}}$$

Коэффициент отражения $R = 0$, при скорости движения границы равной

$$u = c_2 - \frac{\rho_1}{\rho_2} c_1.$$

Полученные соотношения позволяют учесть влияние движений, как границ раздела сред, так и самих сред на частоты отраженных и прошедших во вторую среду волн, а также на коэффициенты отражения и прохождения. Найдены условия отсутствия отражения, обеспечиваемые подбором скоростей движения границы раздела и самих сред.
Заключение

При взаимодействии волн с движущейся границей раздела сред движение сред существенно меняет частоты отраженной и прошедшей волн, коэффициенты отражения и прохождения. Это проявляется наиболее существенно в том случае, когда эти скорости сопоставимы по числовому значению. Подбором скорости движения границы раздела сред и скоростей сред можно добиться отсутствия отраженного сигнала. Получены обобщенные формулы преобразования частоты отраженного и частоты прошедшего сигнала, обобщенные формулы для расчета коэффициентов отражения и прохождения движущейся границы раздела с учетом подвижности сред.

Список литературы

1. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Иванов В.В., Устинова Е.С. Интерференция волн в невзаимных средах // В мире научных открытий. – 2012. – №1.1(25). – С. 98-112.
2. Глущенко А.Г., Захарченко Е.П. Стимулированная прозрачность запредельных структур с активными параметрами. – Saarbrücken LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 186 с.
3. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Основы акустики. – Киев: Наукова думка, 2007. – 640 с.
4. Осташев В. Е. Распространение звука в движущихся средах. – М.: Наука, 1992. – 208 с.

5. Стрэтт Дж. В. Теория звука. М.: ГИТТЛ, 1940. – т. 1. – 500 с., т. 2. – 476 с.

Рецензенты:

Арефьев А.С., д.ф.-м.н., профессор кафедры электродинамики и антенн, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г.Самара.

Тяжев А.И., д.т.н., профессор, профессор кафедры Радиосвязи, радиовещания и телевидения, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г.Самара.