АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXX 1984 Вып. 4

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.26

О ВОЗБУЖДЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ НА НЕОДНОРОДНОЙ ГРАНИЦЕ

Лапин А. Д.

В работах [1, 2] рассмотрена задача о рассеянии звука от плоской неоднородной поверхности с периодически меняющейся акустической проводимостью. Однако в этих работах не исследован важный в практическом отношении случай, когда какой-либо рассеянный спектр является поверхностной волной, бегущей вдоль однородной границы. Представляет интерес рассмотреть задачу о генерации поверхностной волны при падении объемной волны на неоднородную границу, характеризуемую акустической проводимостью. Ниже эта задача решена на основе модифицированной теории возмущений [3], учитывающей эффект многократного рассеяния. Метод ее решения аналогичен изложенному в работе [4].

Пусть жидкое однородное полупространство ($z<0$) ограничено сверху плоскостью $z=0$, характеризующейся акустической проводимостью $Y(x)$ упругого типа ($\operatorname{Re} Y=0$, $\operatorname{Im} Y<0$). Величину $Y(x)$ зададим в виде $Y=[\eta_0+\eta(x)]/(i\rho c)$ при $|x|<L$ и $Y=\eta_0/(i\rho c)$ при $|x|>L$, где $\eta_0=\mathrm{const}$, $\eta(x)$ – периодическая функция координаты x с нулевым средним значением, причем $|\eta(x)|\ll\eta_0$, ρ и c – соответственно плотность среды и скорость звука в ней. Из полупространства на неоднородную границу падает гармоническая объемная волна, характеризуемая давлением

$$p_{\text{пад}}=A\exp[i(\alpha x+\beta z)], \tag{1}$$

где $\alpha>0$, $\beta=(k^2-\alpha^2)^{1/2}$, A и k – соответственно амплитуда и волновое число. Исследуем рассеяние волны (1) от неоднородностей с периодами $\Lambda_1=2\pi/(\xi-\alpha)$ и $\Lambda_2=2\pi/(\xi+\alpha)$, где $\xi=k(1+\eta_0^2)^{1/2}$ – волновое число поверхностной волны в структуре без неоднородностей. Эти периодические неоднородности эффективно возбуждают поверхностные волны, бегущие соответственно в положительном и отрицательном направлениях оси x.

Решение задачи о возбуждении поверхностной волны получим на основе модифицированной теории возмущений [3]. Малым параметром является относительная амплитуда неоднородностей: $\varepsilon\equiv\max|\eta|/\eta_0\ll1$. Выполнив соответственные вычисления, получим, что давление в генерируемой поверхностной волне будет

$$p=i\frac{2k\beta\varkappa A}{\xi(\beta-i\varkappa)}\int\limits_{-L}^{L}\eta(X)\exp\{i[\alpha\mp(\xi+i\delta)]X\}\,dX\exp(\pm i\xi x+\varkappa z-\delta L), \tag{2}$$

где $\varkappa=(\xi^2-k^2)^{1/2}=k\eta_0$, δ – коэффициент затухания поверхностной волны из-за рассеяния на неоднородностях, $|x|\geqslant L$. В формуле (2) верхний и нижний знаки выбираются соответственно при $x>L$ и при $x<-L$.

Коэффициент затухания δ зависит от формы периодических неоднородностей. Представим функцию $\eta(x)$ в виде суммы пространственных гармоник вида $a_n\cos(nQx+\Phi_n)$, где $2\pi/Q$ – пространственный период неоднородностей, a_n и Φ_n – соответственно амплитуда и фаза n-й гармоники. Каждая пространственная гармоника неоднородностей, создающая рассеянный однородный спектр, вносит свой вклад в затухание поверхностной волны. Согласно работе [5], парциальный коэффициент затухания этой волны из-за рассеяния на n-й гармонике будет

$$\delta_n=\frac{k^2\varkappa a_n^2}{4\xi}\frac{[k^2-(\xi-nQ)^2]^{1/2}}{[\xi^2-(\xi-nQ)^2]},\qquad |\xi-nQ|<k. \tag{3}$$

Коэффициент затухания поверхностной волны, бегущей вдоль границы с неоднородностями $\eta(x)$, равен сумме парциальных коэффициентов δ_n.

Исследуем генерацию поверхностной волны на неоднородностях с периодом $\Lambda_1=2\pi/(\xi-\alpha)$. Расчет, аналогичный изложенному в работе [4], показывает, что справа от длинного ($2L\gg\Lambda_1$) неоднородного участка возникает интенсивная поверхностная волна

$$p=i\frac{2k\beta\varkappa Aa_1}{\xi(\beta-i\varkappa)\delta}\operatorname{sh}(\delta L)\exp(i\xi x+\varkappa z-\delta L+i\Phi_1). \tag{4}$$

Слева от этого участка поверхностная волна обусловлена краевым эффектом; ее амплитуда мала и осциллирует с возрастанием L.

Рассчитаем коэффициент преобразования объемной волны в поверхностную. Поток энергии в объемной волне (1) через участок $(-L, L)$ границы равен $E_{\text{пад}}=\beta A^2L/(k\rho c)$. Поток энергии в генерируемой поверхностной волне (4) будет

$$E=\frac{k\beta^2\varkappa A^2a_1^2}{\rho c\xi(\xi^2-\alpha^2)\delta^2}\operatorname{sh}^2(\delta L)\exp(-2\delta L).$$

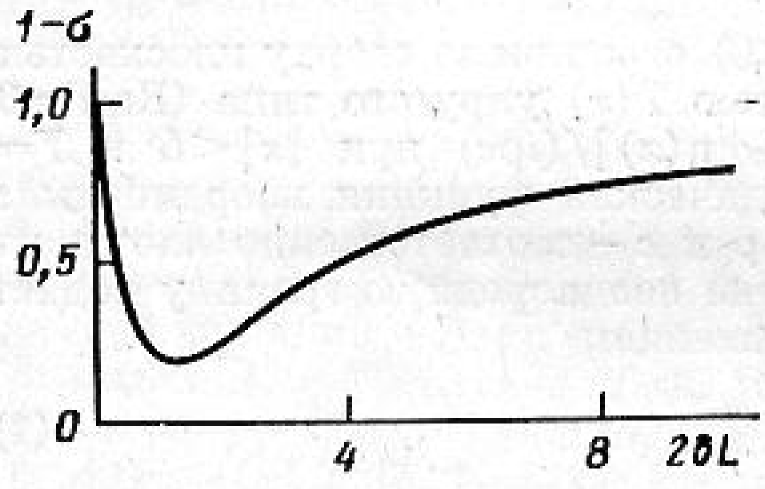
Коэффициент преобразования объемной волны в поверхностную получим по формуле

$$\sigma=E/E_{\text{пад}}=\frac{k^2\beta\varkappa a_1^2}{\xi(\xi^2-\alpha^2)\delta^2L}\operatorname{sh}^2(\delta L)\exp(-2\delta L),$$

При длине неоднородного участка, равной $1,2/\delta$, коэффициент преобразования будет оптимальным: $\sigma_0=0,2(k^2\beta\varkappa a_1^2/\xi(\xi^2-\alpha^2)\delta)$. При учете соотношения (3) эту формулу можно преобразовать к виду $\sigma_0=0,8\delta_1/\delta=0,8\chi$, где $\delta_1=k^2\beta\varkappa a_1^2/4\xi(\xi^2-\alpha^2)$, $\chi=\delta/\delta_1=\sum\limits_n\delta_n/\delta_1\geqslant1$. Безразмерная величина χ характеризует влияние формы периодических неоднородностей на преобразование объемной волны в поверхностную. Для чисто синусоидальных неоднородностей с периодом Λ_1 оптимальный коэффициент преобразования не зависит от их амплитуды и равен 0,8.

Аналогично можно исследовать генерацию поверхностной волны на неоднородностях с периодом $\Lambda_2=2\pi/(\xi+\alpha)$. При падающем поле (1) эти неоднородности создают интенсивную поверхностную волну, бегущую в отрицательном направлении оси x, и не создают рассеянные спектры, уносящие звуковую энергию от границы. Коэффициент преобразования объемной волны в поверхностную получим по формуле $\sigma=4[\operatorname{sh}^2(\delta L)/(\delta L)]\exp(-2\delta L)$, где

$$\delta=\delta_1=k^2\beta\varkappa a_1^2/4\xi(\xi^2-\alpha^2).$$



Зависимость эффективного коэффициента отражения от величины $2\delta L$

Величина $(1-\sigma)$ является эффективным коэффициентом отражения по энергии звукового пучка, падающего на неоднородный участок $(-L, L)$ границы. На фигуре дан график этой величины в зависимости от $2\delta L$. Оптимальное преобразование объемной волны в поверхностную происходит при $2\delta L=1,2$. Оптимальный коэффициент преобразования σ_0 равен 0,8 для неоднородностей любой формы. Минимальное значение коэффициента отражения будет $(1-\sigma_0)=0,2$.

Все полученные результаты не применимы в интервале $0>\alpha/k\lessapprox\varepsilon^2$, т. е. при нормальном падении объемной волны и близком к нему. Согласно работе [6], при расчете преобразования волн на неоднородностях с периодом, равным или близким длине поверхностной волны, необходимо учитывать и квадратичные эффекты по малому параметру ε.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лысанов Ю. П.* Рассеяние звука от плоской неоднородной поверхности с периодически меняющейся акустической проводимостью.– Акуст. журн., 1955, т. 1, с. 58–69.
2. *Лысанов Ю. П.* О рассеянии звука на неоднородной поверхности.– Акуст. журн., 1958, т. 4, № 1, с. 47–50.
3. *Урусовский И. А.* О принципе локальности в теории рассеяния волн на неровных поверхностях.— В кн.: VI Всесоюзн. акуст. конф. М.: АКИН, 1968, А′ V 9.
4. *Лапин А. Д.* Генерация поверхностной волны Лява при наклонном падении сдвиговой объемной волны на границу с периодическими неоднородностями.— Акуст. журн., 1982, т. 28, № 6, с. 805–809.
5. *Лапин А. Д.* Затухание поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы с периодическими неоднородностями.– Акуст. журн., 1980, т. 26, № 2, с. 218–224.
6. *Гуляев Ю. В., Плесский В. П.* Взаимное преобразование объемных и поверхностных акустических волн на периодически возмущенном участке поверхности упругого тела (обзор).— Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 8, с. 1569–1587.

Акустический институт им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10.II.1983