

определения текущего значения доплеровского сдвига необходимо уменьшать l , при этом точность при вычислении текущего спектра будет $\alpha_n l$. Предел уменьшению l кладет естественный рост ширины линии в текущем спектре. Оптимальное значение l находится из условия $\alpha_n l = \pi/l$, откуда $l = \sqrt{\pi/\alpha_n}$. При этом разрешающая способность определения $k_n(x)$ будет равна $\sqrt{\pi/\alpha_n}$. Поскольку в изложенном выше способе разрешающая способность равна π/L , он лучше по разрешению в $\sqrt{\alpha_n L^2/\pi}$ раз. Подкоренное выражение равно числу "естественных" линий в уширенном спектре моды. Ясно, что чем сильнее проявляется неоднородность волновода, тем больше улучшение разрешающей способности.

В заключение отметим, что при обработке сигнала не используется никакой "полиномиальной" специфики — вместо приближения текущей фазы полиномами T_M можно использовать любую подходящую систему функций. Так, при наличии априорной информации о периодическом по трассе изменении $H(x)$ можно использовать систему тригонометрических функций и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Williams R. Creating an acoustic synthetic aperture in ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1976. V. 60. № 1. P. 60–73.
2. Тютюкин В.В., Климов С.П., Мазаников А.А., Меркулов В.Н. Способ измерения скоростей нормальных волн в акустических волноводах и устройство для его осуществления: А.с. 968734 СССР // Б.И. 1981. № 39. С. 3.
3. Горская Н.В., Николаев Г.Н., Рычова Т.А., Салин Б.М. Спектральный анализ при исследовании поля гармонических источников в акустических волноводах // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 2. С. 202–205.
4. Комаров А.Г., Мазаников А.А. Способ измерения скоростей нормальных волн в акустических волноводах: А.с. 1203286 СССР // Б.И. № 40. 1988. С. 3.
5. Лазарев В.А., Петухов Ю.В. Определение горизонтальной крупномасштабной изменчивости акустических характеристик дна океана // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 5. С. 849–854.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
07.05.91

УДК 534–15.2:550.3

© 1992 г.

Д.Г. Малюжинец, В.В. Смирнов

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ ПО ОДНОРОДНОМУ ГЕОАКУСТИЧЕСКОМУ ТРАКТУ

Отсутствие наглядных аналитических связей и полной физической ясности во внешне, казалось бы, простых формулах, которыми пользуется широкий круг физиков и инженеров, может привести к серьезным промахам в инженерной практике. С целью получения упрощений классического локационного уравнения, в развитие ранее опубликованных идей [1, 2] разработан предлагаемый к рассмотрению приближенный метод расчета дальности.

При расчете дальности передачи акустической мощности от излучателя к приемнику через однородную поглощающую среду можно считать, что, начиная с некоторых вполне определенных расстояний, равных толщине (глубине) скин-слоя $\Delta_{СК} = 1/\beta_0$ (здесь β_0 — коэффициент затухания), влияние фактора расширения сферического фронта реальной волны по мере удаления ее от излучателя сравнительно мало сказывается на общих потерях вдоль трассы. Для этих расстояний реальную волну можно заменить эквивалентной плоской волной, а влияние фактора расширения фронта учесть в виде постоянной поправки $a_K = 1,24$ к величине затухания, заменив β_0 на $\beta_{ЭКВ} = a_K \beta_0$. Интенсивность эквивалентной плоской волны в сечении возбуждения ($r = 0$) при этом равна интенсивности поля реального источника, которую тот создает на расстоянии, равном одному скин-слою $\Delta_{СК} = 1/\beta_0$ без учета потерь на поглощение, т.е. при $\beta_0 = 0$. Переход к эквивалентной плоской волне позволяет разбить тракт распространения на сравнительно небольшое (в пределах двух десятков единиц) число эквивалентных скин-слоев $m_{ЭКВ}$, толщина каждого из которых равна $\Delta_{СК}^{ЭКВ} = 1/\beta_{ЭКВ}$, и получить следующую приближенную оценку ожидаемой дальности:

$$\tilde{r} \approx \Delta_{СК}^{ЭКВ} m_{ЭКВ} = \frac{cq}{f_0 a_K} m_{ЭКВ} = 0,93 \frac{cq}{f_0} \lg \frac{P_r}{16\pi^2 q^2}, \quad (1)$$

где c — скорость звука, f_0 — частота поля, q — звукопроницаемость среды — безразмерная величина, обратная пространственному логарифмическому декременту затухания, $P_r = (P_{И}^A/P_{П}^A) K_{И} K_{П}$ — энергетический потенциал аппаратуры (здесь $P_{И}^A, P_{П}^A$ — акустические мощности излучателя и прием-

ника, $K_{\text{и}}$, $K_{\text{п}}$ – коэффициенты направленности тех же элементов). Точность приближенной оценки дальности $\Delta r/r$ в интервале $3 \leq \beta_0 r \leq 20$ не хуже 7,5%, а в интервале $1 \leq \beta_0 r \leq 3$ – не хуже 20%.

Формула (1) является математическим выражением предложенного метода. Полезно показать, что если при расчете акустической мощности на приеме с помощью классического подхода [3] имеет место соотношение

$$P_{\text{п}}^{\text{А}} = (1/4 \pi r^2) P_{\text{и}}^{\text{А}} K_{\text{и}} S_{\text{п}}^{\text{эф}} \exp(-2\beta_0 r), \quad (2)$$

то при использовании нового метода та же мощность определяется выражением

$$P_{\text{п}}^{\text{А}} \approx \frac{1}{4\pi(1/\beta_0)^2} P_{\text{и}}^{\text{А}} K_{\text{и}} S_{\text{п}}^{\text{эф}} \exp(-2a_{\text{к}}\beta_0 \tilde{r}), \quad (3)$$

где $S_{\text{п}}^{\text{эф}} = K_{\text{п}} c^2 / 4\pi f_0^2$ – эффективная поверхность перехвата акустического приемника.

Переход к приближенному решению обосновывается следующим образом. Для исходного выражения (2) вводится безразмерная координата дальности $m = \beta_0 r$ и (2) приводится к виду

$$(\Pi_r)^{-1/2} = (1/4 \pi q) \exp[-ma(m)], \quad (4)$$

где

$$a(m) = 1 + (\ln m)/m. \quad (5)$$

Формула (4) не содержит никаких приближений. Запись ее такова, что в ней, чисто формально, сферической затухающей волне поставлена в соответствие плоская волна с переменным (вдоль новой координаты дальности) безразмерным коэффициентом затухания $a(m)$. Из анализа характера зависимости $a(m)$ нетрудно предположить, что существуют такие расстояния $m \geq m' = \beta_0 r'$, для которых поведение волны, описываемое выражением (4) с переменным вдоль безразмерной трассы коэффициентом затухания $a(m)$, будет мало отличаться от поведения некоторой эквивалентной плоской волны с постоянным вдоль той же трассы безразмерным коэффициентом затухания $a_{\text{к}}$. Замену характеристики $a(m) = 1 + (\ln m)/m$ на постоянное число $a_{\text{к}}$ производят исходя из условия

$$a_{\text{к}} = \frac{1}{m'' - m'} \int_{m'}^{m''} a(m) dm = 1 + \frac{\ln^2 m'' - \ln^2 m'}{2(m'' - m')}, \quad (6)$$

пользуясь стандартной процедурой усреднения $a(m)$ в пределах отрезка (m', m'') , определяющего область приближенного решения.

Условие (6) и вводимая формализация

$$m_{\text{экв}} = \beta_{\text{экв}} \tilde{r} = ma_{\text{к}} \quad (7)$$

позволяет получить решение исходного трансцендентного уравнения (4) для приближенного значения ожидаемой дальности \tilde{r} в общем виде:

$$r = \frac{m_{\text{экв}}}{\beta_{\text{экв}}} = \ln[(\Pi_r)^{1/2} / 4\pi q] (m'' - m') / \beta_0 \int_{m'}^{m''} \left(1 + \frac{\ln m}{m}\right) dm. \quad (8)$$

Границы m' и m'' находят как исходя из оценки точности решения

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{r - \tilde{r}}{r} = 1 - \left(1 + \frac{\ln m}{m}\right) / \left(1 + \frac{\ln^2 m'' - \ln^2 m'}{2(m'' - m')}\right), \quad (9)$$

так и из практических соображений. Так, при выборе верхней границы $m'' = 20$ используют данные о предельных энергетических потенциалах аппаратуры, значения которых, скорее всего, лежат в диапазоне $10^{20} - 10^{24}$. При выборе нижней границы $m' = 1$ стремятся максимально расширить область применения приближенного решения, но при этом учитывают, что при $m < 1$ точность решения резко падает и становится неприемлемой для инженерных расчетов. Легко убедиться, что для выбранных границ $m' = 1$ и $m'' = 20$ значение постоянной $a_{\text{к}} \approx 1,24$.

Ниже конкретизируются физическая сущность метода и достигнутые результаты. Физической основой приближенного метода расчета дальности является введение в рассмотрение эквивалентной плоской волны, коэффициент затухания которой учитывает два вида потерь волновой энергии: из-за поглощения и из-за расширения фронта реальной волны.

Переход к плоской волне имел целенаправленный характер. Известно, что для плоских волн можно ввести стандартизованную глубинностную характеристику – глубину скин-слоя волны $\Delta_{\text{СК}} = cq/f_0$. Эта величина вводится как мера проникающей способности волны в поглощающую среду. Такой же мерой для проникновения эквивалентной плоской волны является толщина эквивалентного скин-слоя $\Delta_{\text{СК}}^{\text{экв}} = cq/f_0 a_{\text{к}}$. Так как вариация значений материальных параметров среды и частоты поля может изменять дальность на многие порядки, то именно эта характеристика, а не энергетический потенциал аппаратуры, в основном и определяют дальность передачи мощности через поглощающую геосреду. Ее можно рассматривать как единицу масштаба достижимой дальности в геосреде.

Приняв глубину (толщину) эквивалентного скин-слоя за единицу масштаба дальности, всю трас-

су распространения разбивают на эквивалентные скин-слои и вводят в расчеты новую равномерную геометро-физическую шкалу дальности. Новая шкала очень удобна для инженерных расчетов тем, что максимальное количество ее градаций, определяемое предельными возможностями аппаратуры и звукопроницаемостью среды, сравнительно невелико (в геосреде порядка 20 скин-слоев).

Наиболее важным практическим выводом, вытекающим из анализа математического выражения метода, является принципиальное положение о том, что при больших потенциалах аппаратуры существенное увеличение (на несколько порядков) излучаемой в среду акустической мощности или такое же увеличение чувствительности приемника дает весьма малое в процентном отношении увеличение дальности. В то же время изменение частоты на несколько десятков процентов может дать куда больший эффект. Мощность излучения в геосреду следует ограничивать величинами порядка десятков ватт. Этот вывод касается тенденции развития в геоакустике технических средств.

Таким образом, сформулированный метод характеризуется, с одной стороны, новой транскрипцией процесса распространения сферической волны в поглощающей среде при расстояниях, превышающих скин-слой, с другой — новой очень удобной геометро-физической шкалой дальности и приближенной формулой, которая раскрывает детали физического процесса распространения волн, устанавливает прозрачные аналитические связи между дальностью и параметрами тракта, что полезно для физиков и инженеров, занимающихся измерениями, проектированием и разработкой геоакустической аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тархов А.Г.* Основы геофизической разведки методом радиокип. М.: Госгеологтехиздат, 1961. 215 с.
2. *Ямщиков В.С., Малюжинец Д.Г.* О глубинности и разрешающей способности георадиолокации // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1980. № 1. С. 75–82.
3. *Урик Р.Дж.* Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.

Московский горный институт
Акустический институт
им. А.А. Андреева

Поступило в редакцию
05.03.90