

УДК 681.883.22

## ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОИСТЫХ СРЕД

© Р.Д. Шилов, 2005

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье

Розглянуто можливу оцінку потенційної точності вимірювання товщі шаруватого середовища за допомогою акустичного профілографа.

Рассмотрена возможная оценка потенциальной точности измерения толщины слоистой среды с помощью акустического профилографа.

Possible evaluation of potential accuracy of thickness measurement of stratified medium using acoustic profiler is considered.

В классе систем информационного обеспечения океанографических исследований одно из ведущих мест занимают системы дистанционной грунтовой съемки, основной задачей которых является исследование разреза донных слоев с определением их характеристик. Одной из основных характеристик донных слоев является толщина (мощность) слоя.

Измерение толщины слоя основано на определении интервала времени  $\Delta t$  между сигналами, отраженными от его границ:

$$h = \frac{c_{\Gamma} \Delta t}{2}. \quad (1)$$

Таким образом, минимальная измеряемая толщина слоя определяется минимально измеряемым интервалом  $\Delta t_{\min}$ . Согласно критерию Рэлея, для импульсов одинаковой амплитуды разрешающая способность по дальности определяется длительностью импульсов по уровню половины амплитуды:

$$h_{\min} = \frac{c_{\Gamma} \tau_{0.5}}{2}. \quad (2)$$

Например, для грубого песка на частоте 100 кГц  $c_{\Gamma} = 1770$  м/с, коэффициент затухания акустической энергии составляет около 52 дБ/м [1]. При  $h_{\min} = 0,2$  м получим, что требуемая длительность импульса  $\tau_{0.5} = 0,226$  мс.

Другим важным параметром профилографа является необходимый динамический диапазон. Если пренебречь затуханием акустической волны в воде по сравнению с затуханием в грунте, что справедливо для всего диапазона используемых частот, а также коэффициентом прохождения волной верхней границы слоя, то максимально возможное отношение амплитуд сигналов, отраженных от верхней и нижней границ слоя будет определяться динамическим диапазоном приемника

$$D=20 \lg \left( \frac{P_B}{P_H} \right) = 2\beta h, \quad (3)$$

где  $D$  – динамический диапазон приемника, дБ;  
 $\beta$  – коэффициент затухания акустической энергии в слое, дБ/м;  
 $h$  – толщина слоя, м.

Для рассмотренного выше грубого песка при динамическом диапазоне приемника, равном 60 дБ, в соответствии с (3) максимально возможная толщина зондирования слоя равна 0,58 м. Если при длительности импульса  $\tau_{0,5}=0,226$  мс ( $h_{\text{мин}}=0,2$  м) уменьшить число периодов несущего колебания до предельно возможного – одного периода (однопериодное колебание), то соответствующая частота будет равна  $f_0 = \frac{1}{\tau_{0,5}} = 4,43$  кГц. Для того же грубого песка затухание акустической энергии на частоте 4,43 кГц составляет около 2 дБ/м. Тогда динамическому диапазону, равному 60 дБ, будет соответствовать максимально возможная толщина зондирования слоя, равная 15 м.

Приведенный пример показывает, что требование высокой разрешающей способности и проникающей способности акустической энергии в слой противоречивы.

Для рассмотренного примера максимально возможная толщина зондируемого слоя равна 15 м лишь при использовании низкочастотной несущей с предельно коротким, однопериодным ( $\tau_{0,5} \gg \frac{1}{f_0}$ ), импульсом. Следует отметить, что увеличить динамический диапазон пропорционально толщине слоя не всегда возможно (для приемников, используемых в гидроакустической аппаратуре, динамический диапазон не превышает, как правило, 60–80 дБ).

Таким образом, при построении профилографа для увеличения возможной толщины зондирования слоя следует уменьшать несущую частоту передатчика, а для улучшения разрешающей способности по дальности может быть рекомендовано использование предельно коротких импульсов.

Вместе с тем следует учитывать тот факт, что отраженный сигнал имеет как полезную, так и шумовую составляющие. В нашем случае отношение сигнал/шум можно представить как отношение интенсивностей сигнала, отраженного границами слоя к интенсивности сигнала, обусловленного объемным рассеянием сигнала в слое.

В табл. 1 представлены результаты расчетов отношения интенсивности сигнала объемного рассеяния к интенсивности сигнала, отраженного верхней границей слоя для глубоководных районов Атлантического океана [2].

В [2] также отмечено, что данные, хотя и приблизительны, но дают правильное представление о порядке величин.

Таким образом, при использовании предельно коротких импульсов, пространственная ширина которых соизмерима с разрешающей способностью профилографа по дальности, представляет интерес оценить потенциальную точность измерения толщины слоистой среды как функции отношения интенсивности сигнала, отраженного верхней границей слоя к интенсивности объемного рассеяния сигнала в слое.

Таблиця 1. Расчетные величины отношения интенсивностей

Частота, кГц	1	2	5	10	15	24
$\frac{I_p}{I_{отр}}$ , %	2,10	6,20	19,00	36,00	50,00	65,00
$\frac{I_{отр}}{I_p}$ , дБ	16,78	12,08	7,21	4,44	3,00	1,87

Оценим потенциальную точность измерения толщины слоя, ограничившись однослойной средой; результаты можно обобщить на слоистую среду с произвольным количеством слоев. Разобьем диапазон измеряемой толщины на  $N$  интервалов с интервалом дискретизации, равным

$$\Delta h = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{N}, \quad (4)$$

где  $\Delta h$  – интервал дискретизации;

$h_{\max}, h_{\min}$  – верхняя и нижняя границы диапазона измерения.

Пусть толщина слоя равна  $h_n = \Delta h \times N$ , где  $N$  – число интервалов дискретизации, укладываемых по толщине слоя. Если вероятность того, что измеряемый слой занимает  $i$ -й интервал дискретизации равна  $p(h_i)$ , то количество информации (энтропия), полученное по результатам зондирования, равно [3]:

$$H = - \sum_{i=0}^{N-1} p(h_i) \times \log_2 p(h_i). \quad (5)$$

Энтропия максимальна, если априорное распределение  $p(h_i)$  равномерно, т.е.

$p(h_i) = \frac{1}{N}$ . Подставив это значение в (5) получим максимальное значение энтропии:

$$H = \log_2 N. \quad (6)$$

Если апостериорное распределение  $p(h_i)$  отличается от априорного, то в результате измерения образуется некоторая разность энтропии, равная  $\Delta H = H - H_{\text{apost}}$ , где  $H_{\text{apost}}$  – энтропия, полученная после выполнения измерения

$$H_{\text{apost}} = - \sum_{i=0}^{N-1} p_{\text{apost}}(h_i) \times \log_2 p_{\text{apost}}(h_i), \quad (7)$$

где  $p_{\text{apost}}(h_i)$  – апостериорная вероятность  $p(h_i)$ .

$\Delta H$  является количественной мерой обновления информации за период зондирования. Т.к. количество информации  $\Delta H$  поступает в течение времени  $T$  ( $T$  – время прохождения сигнала от верхней границы слоя до нижней и обратно), то средняя скорость поступления информации

$$R = \frac{\Delta H}{T} = \frac{1}{T} \left[ \sum_{i=0}^{N-1} p_{\text{apost}}(h_i) \times \log_2 p_{\text{apost}}(h_i) - \sum_{i=0}^{N-1} p(h_i) \times \log_2 p(h_i) \right]. \quad (8)$$

У Шеннона величина (8) называется ненадежностью (или неопределенностью) [4].

Для случая равномерного априорного распределения и при апостериорном распределении вида импульса Кронекера

$$R = \frac{\Delta H}{T} = \frac{\log_2 \left( \frac{h_{\text{max}} - h_{\text{min}}}{\Delta h} \right)}{T} = \frac{\log_2 N}{T}. \quad (9)$$

В [4] показано, что предельная скорость передачи информации для сигнала с эффективной шириной спектра, равной  $\Delta F_{\text{эф}}$ , равна

$$C = \Delta F_{\text{эф}} \times \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (10)$$

где  $\Delta F_{\text{эф}}$  – эффективная ширина спектра мощности сигнала;

$P_c/P_{\text{ш}}$  – отношение сигнал/шум.

При  $R \leq C$  теоретически возможно осуществить измерение толщины слоя со сколь угодно малой погрешностью. При  $R > C$  измерение без погрешности невозможно.

Приравнивая (9) и (10) получаем:

$$\delta = \frac{\Delta h}{h_{\text{max}} - h_{\text{min}}} = \frac{1}{N} = 2^{-T \times \Delta F_{\text{эф}} \times \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)}. \quad (11)$$

Обозначим  $T = n\tau$ , где  $\tau$  – длительность импульса, а отношение сигнал/шум выразим в децибелах:

$$\delta [\%] = 2^{-n \times \tau \times \Delta F_{\text{эф}} \times \log_2 \left( 1 + 10^{\frac{D}{10}} \right)} \times 100\%, \quad (12)$$

где  $D$  – отношение интенсивности сигнала, отраженного границей слоя к интенсивности объемного рассеяния сигнала в слое.

Кривые погрешностей, построенные по формуле (12) в предположении, что  $\tau \times \Delta F_{\text{эф}} = 1$ , для различных  $n$  приведены на рис. 1.

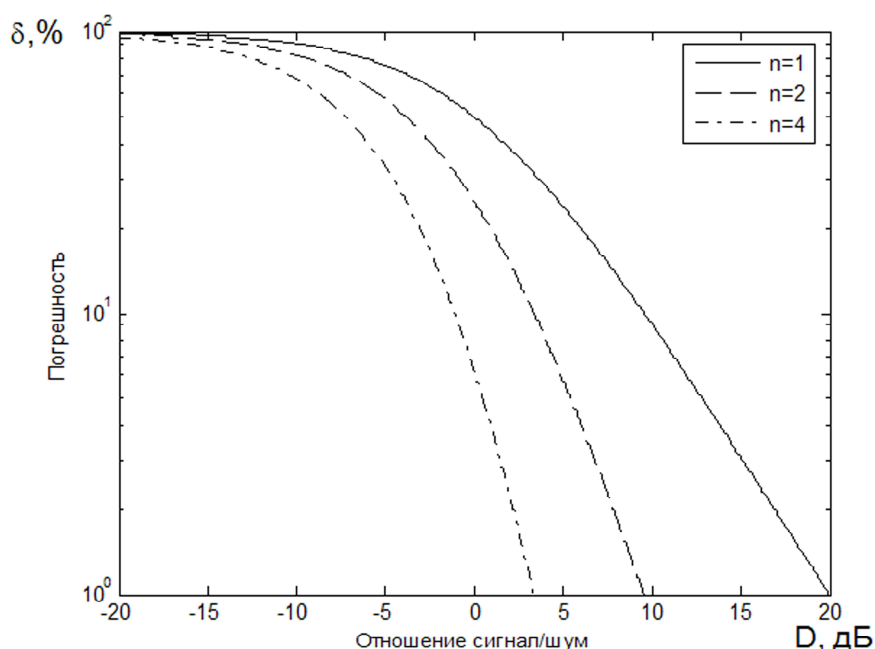


Рис. 1. Зависимость погрешностей от отношения сигнал/шум

Из приведенных на рис. 1 зависимостей видно, что, например, при рабочей частоте 5 кГц  $\left( \frac{I}{I_{\text{отр}}} = 7,21 \text{ дБ} \right)$  и  $n=1$  для того же грубого песка в случае однопериодного импульса минимальное разрешение по дальности будет составлять  $h_{\text{мин}} = 0,18 \text{ м}$  при погрешности около 10,5 %, при  $n=2$  минимальное разрешение по дальности будет составлять  $h_{\text{мин}} = 0,36 \text{ м}$  при погрешности около 2 %.

В то же время при увеличении рабочей частоты и уменьшении длительности импульса кажущееся улучшение разрешающей способности будет сnivelировано ухудшающимся отношением сигнал/шум.

## Литература

1. Гидроакустические методы и средства исследования дна Мирового Океана / Под ред. А.И. Гончара. – Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины, 2002. – 222 с.
2. Акустика океана / Под ред. Л. М. Бреховских. - М.: Наука, 1974. – 696 с.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 832 с.