

УДК 621

## КОРРЕКЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКОГО ДНА

Низамов Т.И., Кулизаде Р.К., Исаев Э.И.

*Азербайджанское национальное аэрокосмическое агентство (АНАКА), Баку, Азербайджан*

**В статье рассматривается метод коррекции амплитудных и геометрических искажений гидроакустических изображений морского дна. Описано влияние дна на эхо-сигнал. Приведены алгоритм проведения коррекции и метод учета уклона дна.**

При проведении морского мониторинга необходимо иметь информацию о рельефе и структуре морского дна, об объектах, имеющих на дне, а также частично или полностью погруженных в грунт. Это особенно важно при проведении работ по инженерной геологии в шельфовой зоне Каспийского моря, насыщенной подводными коммуникациями: нефте- и газо- трубопроводами, функционирующими и заброшенными, линиями связи, остатками изыскательских работ в виде отдельных труб, торчащих из дна, либо заиленных. Эта информация может быть получена с помощью гидроакустического метода, например, с применением гидролокатора бокового обзора (ГБО) [1].

Принцип формирования гидроакустического изображения заключается в следующем: носитель, на котором размещаются приемно-передающие антенны, буксируется с помощью кабель – троса на определенной глубине за судном или выносится за борт при помощи специального выносного устройства. Антенны формируют акустический луч под углом 90 градусов к курсу следования по обе стороны. Этот луч распространяется в воде и отражается некоторой частью морского дна. Вследствие неравномерности дна и наложения объектов, часть энергии звука отражается назад в направлении источника. Приемный тракт ГБО имеет достаточную чувствительность, чтобы получить эти отражения, усилить их и послать блоку обработки данных и регистратору.

Форма луча ГБО имеет значение для формирования конечного изображения и зависит от диаграммы направленности антенны. В рассматриваемом ГБО формируется акустический луч, очень узкий в вертикальной плоскости (0,9 градусов) и намного более широкий (45 градусов) в горизонтальной плоскости. Антенны располагаются на корпусе подводного носителя под определенным углом к вертикальной оси, что дает возможность получения эхо – сигналов от неко-

торой просматриваемой зоны дна. Для формирования гидроакустического изображения используются звуковые отражения от дна и объектов. Наклонные дальности до объектов определяются как половина произведения скорости звука в воде на интервал времени между излучающим и принимаемым сигналами. Эта дальность регистрируется как одна точка на изображении, и множество точек от разных отражающих объектов составляют одну строку изображения, а множество строк, полученных при движении судна, составляют совокупное изображение рельефа дна. Результаты съемки отображаются в черно-белых оттенках, а также, при применении цифрового процессора, в цветном виде с использованием ложных цветов. Черно-белое изображение фиксируется на бумаге, на которой сильные отражатели показываются как темные области, а слабые - как белые. С фотографической точки зрения подобное изображение кажется "негативом". Современная система обработки позволяет при необходимости переводить такое изображение в позитив.

Типичное изображение ГБО содержит множество особенностей, которые должны быть распознаны оператором системы и интерпретатором данных [2]. К таким особенностям относятся следующие: водяной столб, импульс излучения, первое отражение от дна, цели и топографические детали, тени. Акустическая отражающая способность данного сектора морского дна определяется материальными свойствами просматриваемой области. Скала и гравий - лучшие отражатели, чем песок или ил и поэтому выглядят более темными на изображениях морского дна. Физическая форма индивидуальных компонентов материалов сильно влияет на обратное отражение. Топография морского дна также определяет энергию отраженного звукового луча. Наклоны дна в сторону носителя - гораздо лучшие отражатели, чем наоборот, из-за меньшего угла сферы действия импульса излучения.

Топография с меньшим углом сферы действия кажется темной на записи. Обобщая все вышесказанное, можно сделать вывод о том, что сигналу ГБО, отраженному от дна и объектов, присущи амплитудные и геометрические искажения. Амплитудные искажения возникают вследствие неравномерности диаграммы направленности приёмно-передающей антенны ГБО и вследствие изменения угла скольжения акустического луча по дну вдоль развертки строки эхосигнала и вызываемого этим изменением коэффициента отражения. Геометрические искажения возникают при попытке составления двумерного плана дна, когда наклонные дальности до дна и объектов переводятся в горизонтальные дальности. Вопросы коррекции искажений сигнала ГБО в условиях горизонтального дна рассматриваются в работе [3]. Однако, в реальных условиях, дно не горизонтально и может иметь уклон.

**Влияние уклона дна на эхо-сигнал**

К основным параметрам сигнала, изменяющимся при имеющемся уклоне дна, в сравнении с горизонтальным, относятся следующие:

- а) изменение расстояния до объекта;
- б) изменение угла падения акустического луча;

в) изменение эффективной площади отражающего участка;

г) изменение размеров участка дна, попадающего в зону обзора антенны с постоянной диаграммой направленности.

На рис.1 приведен сектор морского дна, имеющий определенный уклон в полосе обзора. На этом рисунке и далее в тексте приняты следующие обозначения:

$\theta_0$  - угол наклона оси диаграммы направленности антенны относительно вертикали;

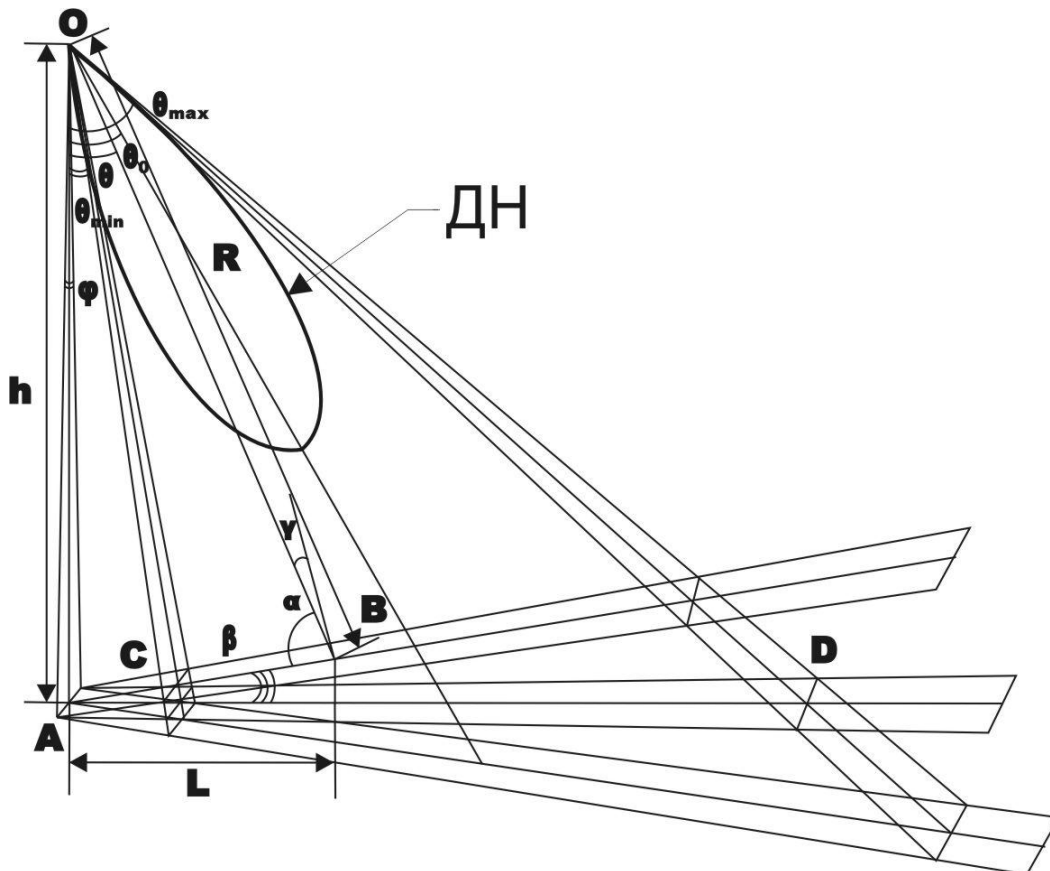
$\theta$  - угол между рассматриваемым лучом и вертикальной осью;

$q_{min}$  и  $q_{max}$  - углы, соответствующие началу и концу зоны обзора;

$\alpha$  и  $\gamma$  - соответственно, углы скольжения и падения луча;

$\phi$  - угол раскрытия диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости (на уровне 0,7);

$\beta$  - угол наклона дна относительно горизонтали;  $c$  - скорость распространения звука в водной среде;  $t$  - длительность излучающего сигнала;  $R$  и  $L$  - соответственно, наклонная и горизонтальная дальности до отражающих участков;  $h$  - высота носителя антенн над дном.



**Рисунок 1.** Полоса обзора дна.

ДН – диаграмма направленности антенны, О – точка расположения антенны, А – проекция антенны на дно, CD – полоса обзора, ОВ – произвольный луч.

Из геометрии рисунка выводятся формулы для определения параметров, учитываемых при проведении коррекции искажений акустического изображения сигнала.

Расстояние до объекта:

$$R = c \cdot t / 2 \quad (1)$$

Угол излучения рассматриваемого луча относительно вертикали:

$$q = \arcsin \left( \frac{h \cdot \sin 2 \cdot b + \sqrt{h^2 \cdot \sin^2 (2 \cdot b) + 4 \cdot (R^2 - h^2) \cdot \cos^2 b}}{2 \cdot R} \right) \quad (2)$$

Угол излучения луча относительно оси диаграммы направленности антенны равен разности  $\theta_0 - \theta$ .

Горизонтальная дальность до объектов равна:

$$L = R \cdot \sin q \quad (3)$$

или:

$$L = \frac{h \cdot \sin 2 \cdot b + \sqrt{h^2 \cdot \sin^2 (2 \cdot b) + 4 \cdot (R^2 - h^2) \cdot \cos^2 b}}{2} \quad (4)$$

или:

$$L = \frac{h \cdot \operatorname{tg} q}{1 + \operatorname{tg} b \cdot \operatorname{tg} q} \quad (5)$$

Угол скольжения равен:

$$a = 90^\circ - q + b \quad (6)$$

Угол падения равен:

$$g = q - b \quad (7)$$

Формула для геометрической коррекции выведена при следующих допущениях. Каждая строка изображения содержит эхо – сигналы, полученные при углах излучения от  $\theta_{\min}$  до  $\theta_{\max}$ , и в строке имеется  $N$  отсчетов эхо – сигнала,  $i$  – номер отдельно взятого отсчета;  $i = 0 \dots N-1$ . Тогда  $i$ -тому отсчету можно сопоставить эхо – сигнал, соответствующий отражению от участка, наклонная (горизонтальная) дальность до которого равна  $R[i]$  ( $L[i]$ ). Пусть, кроме того, максимальные и минимальные наклонные и горизонтальные дальности до отражающих участков будут, соответственно,  $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$ ,  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$ , равные выражениям:

$$R_{\max} = \frac{h}{\cos q_{\max} + \operatorname{tg} b \cdot \sin q_{\max}} \quad (8)$$

$$R_{\min} = \frac{h}{\cos q_{\min} + \operatorname{tg} b \cdot \sin q_{\min}} \quad (9)$$

$$L_{\max} = \frac{h \cdot \operatorname{tg} q_{\max}}{1 + \operatorname{tg} b \cdot \operatorname{tg} q_{\max}} \quad (10)$$

$$L_{\min} = \frac{h \cdot \operatorname{tg} q_{\min}}{1 + \operatorname{tg} b \cdot \operatorname{tg} q_{\min}} \quad (11)$$

Вдоль строки наклонные дальности увеличиваются с постоянным шагом  $\Delta R$ , равным:

$$\Delta R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{N - 1} \quad (12)$$

Тогда можно представить  $i$ -тый отсчет как:

$$R[i] = R_{\min} + i \cdot \Delta R \quad (13)$$

Напротив, горизонтальные дальности вследствие нелинейных преобразований при расчете не имеют постоянного шага изменения, а имеют тенденцию уменьшения его с разверткой строки, что обуславливает необходимость геометрической коррекции. Тогда позиция  $i$ -го отсчета  $X[i]$  на изображении, имеющем ширину  $w$  и отображающем геометрически откорректированную картину участка подводного рельефа, будет равна:

$$X[i] = \frac{w \cdot (L[i] - L_{\min})}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (14)$$

где:

$$L[i] = \frac{h \cdot \sin 2 \cdot b + \sqrt{h^2 \cdot \sin^2 (2 \cdot b) + 4 \cdot (R^2[i] - h^2) \cdot \cos^2 b}}{2} \quad (15)$$

Данная формула позволяет проводить геометрическую коррекцию в реальном режиме времени. Для отложенной во времени коррекции подходит более простая формула (5) { вместе с (14)}. В частности, при  $b = 0$  и  $q_{\min} = 0$  формула (14) приобретает вид [3]:

$$X[i] = \frac{w}{N \cdot \cos(\alpha_{\min})} \cdot \sqrt{i^2 \cdot (1 - \sin(\alpha_{\min}))^2 + 2 \cdot i \cdot N \cdot \sin(\alpha_{\min}) (1 - \sin(\alpha_{\min}))} \quad (16)$$

где  $\alpha_{\min}$  – значение угла скольжения в конце зоны обзора.

### Алгоритм проведения коррекции

Запуск программы коррекции. Ввод начальных значений ( $\theta_0$ ,  $\theta_{\min}$ ,  $\theta_{\max}$ ). Затем для всех строк изображения осуществляется следующая последовательность действий:

- Ввод значений  $h$ ,  $\beta$ ,  $N$ .
- Для всех элементов одной строки изображения осуществляется следующая последовательность действий:
  - определение времени прихода отраженного сигнала  $t$ ;
  - определение наклонной дальности до объекта  $R$ ;
  - определение углов  $\theta$ ,  $\theta_0 - \theta$ . Расчет коэффициента направленности рассматриваемого акустического луча  $K(\theta_0 - \theta)$ . При превышении им определенного порогового значения (допустим, 0,7) уменьшение яркости изображения (на позитиве) на соответствующий коэффициент;
  - определение угла скольжения. При уменьшении его ниже порогового уровня (согласно закону Ламберта, ниже  $45^\circ$ ) увеличение яркости изображения (на позитиве) на соответствующий коэффициент;

- проведение геометрической коррекции: определение горизонтальной дальности до рассматриваемого участка; затем отображение выбранного элемента, для которого уже осуществлена амплитудная коррекция, в рассчитанной позиции.

### Методы учета уклона дна

Коррекция сигнала по выведенным выражениям может быть осуществлена в реальном режиме времени, если априорно известны значения углов уклона дна в зоне съемки. Для уменьшения погрешностей предлагаемого метода целесообразно прокладывать курс так, чтобы судно проходило над точками перегиба дна водоема. Если же мы не располагаем информацией о глубинах в обследуемых районах, то во время съемок все результаты сохраняются в памяти, и обработка откладывается до момента точного определения уклона дна. В течение съемок же необходимо фиксировать точную глубину водоема во всех точках следования судна при помощи эхолотирования. При проведении комплексных работ, когда важна информация не только о рельефе дна, но и его структуре, может быть применена гидроакустическая система, состоящая из ГБО, а также из геолокатора – профилографа, что включает необходимость эхолотирования.

Профилограф, исследуя структуру дна, также снабжает информацией о глубине моря. Проведением нескольких галсов судна, и географической привязкой получаемых изображений гидро - и геолокатора, можно получить точные значения глубины и вычислить средние значения уклона дна, рельеф которого представляется после обработки изображения ГБО. Если  $H_1$  и  $H_2$  – глубины при различных галсах, а  $L_g$  – межгалсовое расстояние, то угол уклона будет равен:

$$b = \arctg\left(\frac{H_1 - H_2}{L_g}\right) \quad (17)$$

Применение данного метода ограничено предельным значением угла уклона дна, поскольку логика формирования гидроакустиче-

ского изображения требует, чтобы отражающие участки дна с большей горизонтальной дальностью имели бы и большую наклонную дальность, иначе возникает неоднозначность в определении местоположения отражающего участка. Тогда форма рельефа может быть описана уравнением спирали с центром в точке излучения в четвертом квадранте полярных координат. Соответственно, максимальный угол наклона дна, при котором не нарушается вышеуказанный принцип соответствия наклонных и горизонтальных дальностей, можно определить как угол наклона касательной к этой спирали в точке, соответствующей началу зоны обзора. Решая совместно уравнения спирали и касательной, получим следующее выражение для максимального угла уклона дна:

$$b_{\max} = \arctg\left[\frac{\left(\frac{3 \cdot p}{2} + q_{\min}\right) \cdot \sin(q_{\min}) - \cos(q_{\min})}{\left(\frac{3 \cdot p}{2} + q_{\min}\right) \cdot \cos(q_{\min}) + \sin(q_{\min})}\right] \quad (18)$$

В частности, при  $q_{\min} = 30^\circ$   $b_{\max} = 18^\circ$ . На практике реальные значения углов уклона дна в шельфовой зоне редко превышают полученные значения  $b_{\max}$ . В частности, в Каспийском море, в районе Нефтяных Камней средний уклон равен  $3^\circ - 5^\circ$ , и поэтому данный метод использован при составлении программы мониторинга шельфовой зоны Каспийского моря.

### Литература

1. А.С. №1230427 G01 S15/89, БИ №22, 1986 (СССР). Гидролокационная система регистрации и обработки информации / Т.К.Исмаилов, Т.И.Низамов, Р.К.Кулизаде и др.
2. J.P. Fish. Acoustic and Sonar Primer. <http://www.instituteformarineacoustics.org/SonarPrimer/SideScanSonar.htm>
3. Низамов Т.И. “Метод контроля экологического состояния водной среды с помощью акустических средств” // Успехи современного естествознания, 2003, №7, с.29-32.

## Correction of the Amplitudes and Geometrical distortions of the Hydroacoustic Images of a Seabottom

Nizamov T.I., Kulisade R.K., Isaev E.I.  
The Azerbaijan National Space Agency (ANSA), Baku, Azerbaijan

In article the method of correction of distortions of hydroacoustic images of a sea-bottom is considered. Thus the inclination of a bottom is taken into account. Settlement formulas and algorithm of the program of correction are resulted.