

УДК 551.46

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА И ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЛЬЕФА ДНА НА КОРРЕЛЯЦИЮ РАССЕЯННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

© О.С. Голод, А.И. Гончар, Ю.А. Гончар, Л.И. Шлычек, 2007

Государственный Северо-Западный технический университет, г. Санкт-Петербург

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

Вивчається вплив параметрів гідролокатора бокового огляду (ГБО) і особливостей рельєфу дна (нахил дна) на кореляційні зв'язки акустичних сигналів і просторово-рознесених приймачів. Отримані співвідношення можуть бути використані при проведенні розрахунків коефіцієнту кореляції розсіяних дном сигналів, що приймаються антенною системою ГБО з рознесеними фазовими центрами.

Изучается влияние параметров гидролокатора бокового обзора (ГБО) и особенностей рельефа дна (наклона дна) на корреляционные связи акустических сигналов и пространственно-разнесенных приемников. Полученные соотношения могут быть использованы при проведении расчетов коэффициента корреляции рассеянных дном сигналов, принимаемых антенной системой ГБО с разнесенными фазовыми центрами.

Influence of the parameters of the side-scan echograph and features of the relief (incline of the bottom) on the correlation connections of the acoustic signals and spaced sensor receivers is learned. Received relations can be used during making calculations of the coefficient of the correlation of the bottom-scattered signals, received by the scanner system of the side-scan echograph with spaced phase centres.

### ГИДРОЛОКАТОР, РЕВЕРБЕРАЦИЯ, ФРОНТ ВОЛНЫ, ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ, РАССЕЯНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ

Источником информации при измерении рельефа дна (картографировании) гидролокатором бокового обзора (ГБО) служит процесс изменения звукового поля донной реверберации. Специфические трудности, возникающие при фазовом методе измерения рельефа с помощью ГБО, обусловлены зависимостью интенсивности рассеянного дном звукового поля не только от характера профиля, но и от случайных неоднородностей грунта, морской среды и некоторых других факторов. Поэтому, для оценки точности измерителей и их помехоустойчивости необходимо знание статистических характеристик отраженного поля, в частности, пространственно-временной корреляционной функции. Методам расчета таких характеристик при различной степени идеализации распространения звука, в зависимости от целей исследования, посвящен ряд отечественных и зарубежных публикаций [1-3]. Целью данной работы является изучение влияния параметров ГБО и особенностей рельефа (наклона дна) на корреляционные связи акустических сигналов и пространственно-разнесенных приемников.

На основании обобщенной двумерной теоремы о наложении случайных возмущений [1] взаимная корреляционная функция на выходе двух гидроакустических преобразователей имеет следующий вид:

$$B_{12}(\zeta, t_1, t_2) = \langle n_1 \rangle \langle a^2 \rangle \int_{D(\xi, t)} W(\xi) S_1(t, t_1, \xi, \zeta) S_2(t, t_2, \xi, \zeta) dt d\xi, \quad (1)$$

где  $\zeta$  - параметры, характеризующие положение приемников;

- $t_1, t_2$  - моменты поступления сигналов в первый и второй приемники;  
 $t$  - момент прохождения фронта акустической волны через фиксированную точку пространства (например, начало координат);  
 $\xi$  - обобщенные координаты рассеивателей;  
 $W(\xi)$  - плотность распределения рассеивателей;  
 $\langle n_1 \rangle$  - среднее число возмущений, приходящих в точку приема;  
 $\langle a^2 \rangle$  - интенсивность принимаемых сигналов;  
 $S_i(t, t_i, \zeta, \xi)$  - возмущение в  $i$ -м приемнике в момент времени  $t_i$ , вызванное рассеивателем с координатой  $\xi$ ;  
 $D(\xi, t)$  - область интегрирования.

В процессе анализа будем полагать, что процесс реверберации допускает стационаризацию; все элементарные возмущения имеют форму, одинаковую с излученными импульсами, т.е. представляют собой гармонические колебания с огибающей  $S_0(t)$ ; возмущения, возникающие в непересекающихся областях поверхности дна. В этих условиях коэффициенты  $\langle n_1 \rangle$  и  $\langle a^2 \rangle$  постоянны.

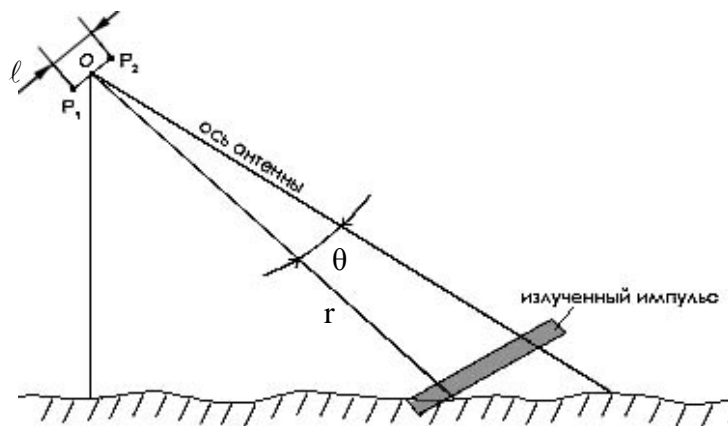


Рис. 1 - Сечение сферической системы координат, связанной с антенной ГБО, координата  $\alpha$  перпендикулярна плоскости рисунка

Рассмотрим сечение сферической системы координат  $r, \theta, \alpha$ , связанной с антенной ГБО (рис.1). Пусть  $l$  - расстояние между приемниками  $P_1$  и  $P_2$ . Тогда  $\Delta t = l \sin \theta \cos \alpha / 2c$ ;  $\zeta = l$ ;  $\xi = (\theta, \alpha)$ ;  $t_1 - t_2 = \tau$  и формула (1) может быть записана в виде:

$$B_{12} = \int \int \int_{D(\alpha, \theta, t)} I \varphi_n^1 \varphi_n^2 \varphi_{\Pi}^1 \varphi_{\Pi}^2 \varphi_1 \varphi_2 S_0(t - \Delta t) \cos \omega_o(t - \Delta t) S_0(t + \Delta t + \tau) \times \cos \omega_o(t + \Delta t + \tau) dt d\alpha d\theta, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  - время запаздывания сигнала в приемнике по отношению к центру антенной базы.

В этой формуле  $I = I(\alpha, \theta, \tau)$  - коэффициент, учитывающий распределение рассеивателей относительно антенны с учетом геометрии дна, наклона антенны и нормировки плотности  $W(\xi)$ .

Характеристики направленности излучателей и приемников  $\varphi_n^i$  и  $\varphi_{\Pi}^i$  в большинстве практически важных случаев можно считать одинаковыми в обоих гидроакустических преобразователях и описывать функциями вида:

$$\varphi_n^i = \varphi_{\Pi}^i = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{\alpha_1} \right)^2 \right]^{-Y_2} \left[ 1 + \left( \frac{\theta}{\theta_o} \right)^2 \right]^{-Y_2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_1, \theta_o$  - параметры, характеризующие ширину диаграммы направленности.

Символами  $\varphi_i = \varphi_i(t_i, t, \alpha, \theta)$  обозначены характеристические функции множеств  $\Omega_i = \Omega_i(t_i, t, \alpha, \theta)$  направлений, из которых в момент  $t_i$  поступают возмущения в  $i$ -й приемник, т.е.  $\varphi_i(t_i, t, \alpha, \theta) = 1$ , если в момент  $t_i$  в приемник поступает возмущение от рассеивателей, находящихся в направлении  $(\alpha, \theta)$ , проходящем через начало координат в момент времени  $t$ , в противном случае  $\varphi_i(t_i, t, \alpha, \theta) = 0$ . Множитель  $\varphi_1 \varphi_2$  позволяет учитывать при расчете корреляционной функции только те возмущения, которые поступили в оба канала от одних и тех же отражателей.

Для определения конкретного вида функций  $I(\alpha, \theta, \tau)$  и  $\varphi_i(t_i, t, \alpha, \theta)$  рассмотрим следующую модель. Построим декартову прямоугольную систему координат, поместив начало отсчета  $O$  в середине отрезка  $P_1 P_2$ , а ось аппликат, направив вертикально вверх. Пусть участок дна, где расположены отражатели, чьи рассеянные сигналы поступают в гидроакустические преобразователи в течение рассматриваемого промежутка времени, представляет собой область на плоскости  $P$ . Линии пересечения этой плоскости с координатными плоскостями образуют с осью абсцисс и осью ординат соответственно углы  $\nu$  и  $\beta$ . Вычислим координаты вектора нормали плоскости  $P$  в выбранной системе координат:

$$\bar{N} = \bar{O}_1 A + \bar{O}_1 B = \cos \beta \sin \nu \bar{i} + \cos \nu \sin \beta \bar{j} - \cos \nu \cos \beta \bar{k}.$$

Обозначим  $(-h)$  аппликату точки пересечения плоскости  $P$  с осью  $Oy$ . Наряду с системой координат  $Oxyz$  будем рассматривать систему  $Ox'y'z'$ , полученную поворотом исходной на угол  $\pi/1 - \gamma_o$  вокруг оси  $Ox$ .

Уравнение плоскости  $P$  в этой системе координат:

$$\begin{aligned} x' \cos \beta \sin \nu + (y' + h \cos \gamma_o) (\sin \gamma_o \cos \nu \sin \beta - \cos \gamma_o \cos \nu \cos \beta) - \\ - (z' + h \sin \gamma_o) \cos \gamma_o \cos \nu \sin \beta + \sin \gamma_o \cos \nu \cos \beta = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Сферические координаты  $(r, \theta, \alpha)$  связаны с декартовыми  $(x', y', z')$  формулами:

$$x' = r \sin \theta \sin \alpha; \quad y' = r \sin \theta \cos \alpha; \quad z' = -r \cos \theta. \quad (5)$$

Чтобы получить уравнение множества точек, из которых сигнал придет в точку 0 через интервал времени  $t$  после излучения, положим в (5)  $r = ct/2$  и подставим  $x', y', z'$ , из (5) в (4). В угловых координатах уравнение искомого множества имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{ct}{2} \sin \theta \sin \alpha \cos \beta \sin \nu + \left( \frac{ct}{2} \sin \theta \cos \alpha + h \cos \gamma_o \right) \times \\ & \times (\sin \gamma_o \cos \nu \sin \beta - \cos \gamma_o \cos \nu \cos \beta) - \left( h \sin \gamma_o - \frac{ct}{2} \cos \theta \right) \times \\ & \times (\cos \gamma_o \cos \nu \sin \beta + \sin \gamma_o \cos \nu \cos \beta) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Антенна ГБО является узконаправленной по  $\alpha$ , поэтому можно считать  $\cos \alpha \approx 1$ . Разрешив уравнение (6) относительно  $\theta$ , получаем:

$$\theta = \Theta(t, \alpha) = \gamma_o + \beta - \arcsin \left[ \frac{2h \cos \beta}{ct} (1 + \chi) \right], \quad (7)$$

где

$$\chi = \sin \alpha \cos \beta \operatorname{tg} \nu / \sin(\gamma_o + \beta) \operatorname{tg}(\gamma_o + \beta).$$

Вычислим угловые координаты  $\theta_{\Pi}^1$  тех отражателей, от которых в момент  $t_1$  в приемник  $P_1$  приходит передний фронт реверберации. Из точек с координатами  $(\theta_{\Pi}^1, \alpha)$  этот фронт придет в начало координат в момент:

$$t = t_1 + \frac{\ell}{2c} \sin \theta_{\Pi}^1 \cos \alpha \approx t_1 + \frac{\ell}{2c} \sin \theta_{\Pi}^1.$$

Следовательно,  $\theta_{\Pi}^1$  может быть найдено из уравнения:

$$\theta_{\Pi}^1 = \Theta \left( t_1 + \frac{\ell}{2c} \sin \theta_{\Pi}^1, \alpha \right),$$

которое при  $(1 + \chi) 2h \cos \beta / ct \neq 1$  можно приближенно решить следующим образом.

Разложим функцию (7) в ряд Тейлора по переменной  $t$ :

$$\Theta(t, \alpha) = \Theta(t_0, \alpha) + \frac{2h \cos \beta (1 + \chi)}{t_0 \sqrt{c^2 t_0^2 - 4h^2 \cos^2 \beta (1 + \chi)^2}} (t - t_0) + \dots$$

Подставим  $t_0 = t_1$ ,  $t = t_1 + \ell \sin \theta_{\Pi}^1 / 2c$ :

$$\begin{aligned} \theta_{\Pi}^1 = \Theta \left( t_1 - \frac{\ell}{2c} \sin \theta_{\Pi}^1, \alpha \right) = \Theta(t_1, \alpha) + \Omega(t_1, \alpha) [ \sin \Theta(t_1, \alpha) + \\ + \cos \Theta(t_1, \alpha) (\theta_{\Pi}^1 - \Theta(t_1, \alpha)) ] + \dots, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\Omega(t, \alpha) = \frac{\ell h \cos \beta (1 + \chi)}{ct \sqrt{c^2 t^2 - 4h^2 \cos^2 \beta (1 + \chi)^2}}. \quad (9)$$

При малых  $\Omega$  находим:

$$\theta_{\Pi}^1 = \Theta_{\Pi}^1(t, l) = \Theta(t_1, \alpha) + \frac{\Omega(t_1, \alpha) \sin \Theta(t_1, \alpha)}{1 - \Omega(t_1, \alpha) \cos \Theta(t_1, \alpha)}. \quad (10)$$

Одновременно в приемник  $P_1$  поступают возмущения в других фазах от отражателей, расположенных в других точках. Так, задний фронт волны, который запаздывает относительно переднего на интервал времени  $\delta$ , поступает в приемник  $P_1$  в момент времени  $t_1$  из точек с угловыми координатами

$$\theta_3^1 = \Theta \left( t_1 - \delta - \frac{l}{2c} \sin \theta_3^1, \alpha \right) = \Theta(t_1 - \delta, \alpha) + \frac{\Omega(t_1 - \delta, \alpha) \sin \Theta(t_1 - \delta, \alpha)}{1 - \Omega(t_1 - \delta, \alpha) \cos \Theta(t_1 - \delta, \alpha)}. \quad (11)$$

Аналогично, точки, из которых передний и задний фронт волны поступают в момент времени  $t_2$  в приемник  $P_2$ , имеют координаты:

$$\theta_{\Pi}^2 = \Theta_{\Pi}^2(t, \alpha) = \Theta(t_2, \alpha) - \frac{\Omega(t_2, \alpha) \sin \Theta(t_2, \alpha)}{1 + \Omega(t_2, \alpha) \cos \Theta(t_2, \alpha)}, \quad (12)$$

$$\theta_3^2 = \Theta_3^2(t, \alpha) = \Theta(t_2 - \delta, \alpha) - \frac{\Omega(t_2 - \delta, \alpha) \sin \Theta(t_2 - \delta, \alpha)}{1 + \Omega(t_2 - \delta, \alpha) \cos \Theta(t_2 - \delta, \alpha)}. \quad (13)$$

Пределы изменения  $\alpha$  определяются характеристиками направленности и их можно считать не зависящими от  $t$  и  $\theta$ :

$$-\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_1. \quad (14)$$

Таким образом, область интегрирования  $D(t, \alpha, \theta)$  определяется следующими функциями:

$$t_{\min} = \frac{2h \cos \beta}{c}, \quad t_{\max} = \frac{2h \operatorname{ctg} \beta}{c}$$

$$\theta_{\text{H}} = \theta_{\frac{1}{3}}, \quad \theta_{\beta} = \theta_{\frac{2}{\Pi}}, \quad \text{при} \quad \theta_{\frac{1}{3}} < \theta_{\frac{2}{\Pi}} < \theta_{\frac{1}{\Pi}}.$$

$$\theta_{\text{H}} = \theta_{\frac{2}{3}}, \quad \theta_{\beta} = \theta_{\frac{1}{\Pi}}, \quad \text{при} \quad \theta_{\frac{1}{3}} < \theta_{\frac{2}{3}} < \theta_{\frac{1}{\Pi}}.$$

$D = \emptyset$ , когда  $\theta_{\frac{1}{\Pi}} < \theta_{\frac{2}{3}}$  или  $\theta_{\frac{2}{\Pi}} < \theta_{\frac{1}{3}}$ , где  $\emptyset$  – пустое множество.

Для определения коэффициента  $I(t, t_i, \alpha, \alpha)$  при равномерном распределении отражателей по поверхности дна рассмотрим связь между угловыми координатами  $(\alpha, \theta)$  и декартовыми прямоугольными координатами на плоскости  $P$ :

$$x'' = r[\sin \theta \sin \alpha + \sin \nu \sin(\gamma_0 - \theta)] + h \sin \nu, \quad (15)$$

$$y'' = r[\cos(\gamma_0 - \theta) + \sin \beta \sin(\gamma_0 - \theta)] + h \sin \beta, \quad (16)$$

$$0 = r[\sin \nu \sin \theta \sin \alpha + \sin \beta \cos(\gamma_0 - \theta) + \sin(\gamma_0 - \theta)] - h. \quad (17)$$

Выражая  $r$  из соотношения (17) и подставляя в (15) и (16), найдем формулу перехода от  $(\alpha, \theta)$  к  $(x'', y'')$ . Якобиан этого преобразования при малых  $\nu$  и  $\beta$  имеет вид:

$$G = \frac{h^2 \sin \theta}{\sin(\gamma_0 - \theta) \left[ \sin^2(\gamma_0 - \theta) + \frac{3}{2} \sin \beta \sin 2(\gamma_0 - \theta) \right]}. \quad (18)$$

Чтобы получить  $I$ , нужно разделить (18) на площадь области  $S$ , из которой приходят коррелированные сигналы:

$$I = \frac{G}{S},$$

где

$$S = \int_{\Omega_1} \int_{\Omega_2} G d\alpha d\theta = \frac{2h^2 \alpha_1}{3 \sin \beta} \left\{ \frac{\sin \gamma_0 \sin(\theta_H - \theta_B)}{\sin(\gamma_0 - \theta_H) \sin(\gamma_0 - \theta_B)} + \left( \frac{\sin \gamma_0}{3 \sin \beta} + \cos \gamma_0 \right) \ln \frac{\operatorname{tg}(\gamma_0 - \theta_B) [\operatorname{tg}(\gamma_0 - \theta_H) + 3 \sin \beta]}{\operatorname{tg}(\gamma_0 - \theta_H) [\operatorname{tg}(\gamma_0 - \theta_B) + 3 \sin \beta]} \right\}. \quad (19)$$

$$\alpha = 0$$

Тройной интеграл (2) по области D с учетом (3), (10)-(14), (18) и (19) преобразуется к трехкратному:

$$B_{12}(\tau, \ell) = A \int_{-\alpha_1}^{\alpha} \frac{d\alpha}{1 + \left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \frac{dt}{S} \int_{\theta_H(t, \alpha)}^{\theta_B(t, \alpha)} G \left[ 1 + \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^2 \right]^{-1} S_0(t - \Delta t) S_0(t + \Delta t + \tau) \times \cos \omega_0(t - \Delta t) \cos \omega_0(t + \Delta t + \tau) d\theta, \quad (20)$$

где A – постоянный коэффициент.

Чтобы получить коэффициент пространственно-временной корреляции, нужно  $B_{12}(\tau, \ell)$  разделить на  $B_{12}(0, 0)$ .

Для приближенного вычисления интеграла (20) представим его в виде:

$$\int_{-\alpha_1}^{\alpha} \frac{1}{2} \frac{d\alpha}{1 + \left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2} \left[ \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \frac{dt}{S} \int_{\theta_H}^{\theta_B} G \left[ 1 + \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^2 \right]^{-1} S_0(t - \Delta t) S_0(t + \Delta t + \tau) \times \cos \omega_0 \left( \tau + \frac{\ell}{c} \sin \theta \right) d\theta + \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \cos 2\omega_0 \left( t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{dt}{S} \int_{\theta_H}^{\theta_B} G \left[ 1 + \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^2 \right]^{-1} \times S_0(t - \Delta t) S_0(t + \Delta t + \tau) d\theta. \quad (21)$$

Поскольку второй интеграл в квадратных скобках содержит множитель, осциллирующий с частотой  $2\omega_0$ , то им можно пренебречь.

Пусть излучаемый сигнал имеет форму прямоугольного импульса. Тогда произведение  $S_0(t - \Delta t) S_0(t + \Delta t + \tau)$  отлично от нуля только в промежутке  $[t_2 + \Delta t + \tau, t_2 - \Delta t + \delta]$ :

$$S_0(t - \Delta t) S_0(t + \Delta t + \tau) = \begin{cases} 1, & \text{при } |2\Delta t + \tau| < \delta, \quad t \in [t_2 + \Delta t + \tau, t_2 - \Delta t + \delta], \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (22)$$

Следовательно, промежуток интегрирования  $[t_{\min}, t_{\max}]$  можно заменить промежутком  $[t_2 + \tau, t_2 + \delta]$ . Производя в выражении (21) замену переменных:

$$\theta = \theta_H + (1 + u) \frac{\theta_B - \theta_H}{2},$$

и изменяя порядок интегрирования, приводим интеграл к виду:

$$B_{12}(\tau, \ell) = \frac{A}{2} \int_{-\alpha_1}^{\alpha_1} \frac{d\alpha}{1 + \left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2} \int_{-1}^1 du \int_{t_\lambda(u, \alpha)}^{m(u, \alpha)} \frac{G(\theta_B - \theta_H)}{S} \cos \omega_o \left\{ \tau + \frac{\ell}{c} \times \right. \\ \left. \times \sin \left[ \theta_H + \frac{(\theta_B - \theta_H)(1 + u)}{2} \right] \right\}, \quad (23)$$

где  $t_\lambda(u, \alpha)$  - корень уравнения:

$$t_\lambda = t_2 + \frac{\ell}{2c} \sin \left\{ \theta_H(t_\lambda, \alpha) + \left[ \theta_B(t_\lambda, \alpha) - \theta_H(t_\lambda, \alpha) \right] \frac{1 + u}{2} \right\} + \tau,$$

$t_\Pi(u, \alpha)$  - корень уравнения:

$$t_\Pi = t_2 - \frac{\ell}{2c} \sin \left\{ \theta_H(t_\Pi, \alpha) + \left[ \theta_B(t_\Pi, \alpha) - \theta_H(t_\Pi, \alpha) \right] \frac{1 + u}{2} \right\} + \delta.$$

Учитывая, что в области

$$t_2 + \tau \leq t \leq t_2 + \delta, \quad -\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_1$$

функции  $\theta_B$  и  $\theta_H$  изменяются медленно, заменим их значениями при  $t = t_2 + (\delta + \tau)/2, \alpha = 0$ . Проинтегрировав по  $t$  и по  $\alpha$  соотношение (23), преобразуем его к виду:



$$\begin{aligned}
 B_{12}(\tau, \ell) = & \frac{A}{2} \frac{\pi}{2} \frac{\delta}{S} \frac{\theta_B - \theta_H}{2} \int_{-1}^1 \left\{ 1 + \left[ \frac{\theta_H + \frac{\theta_B + \theta_H}{2}(1+u)}{\theta_0} \right]^2 \right\}^{-1} \times \\
 & \times G \cos \omega_0 \left\{ \tau + \frac{\ell}{c} \sin \left[ \theta_H + (\theta_B - \theta_H) \frac{1+4}{2} \right] \right\} \times \\
 & \times \left[ 1 - \frac{\left| \tau + \frac{\ell}{c} \sin \left[ \theta_H + (\theta_B - \theta_H) \frac{1+4}{2} \right] \right|}{\delta} \right] du.
 \end{aligned} \tag{24}$$

Выполнив подстановку:

$$x = \frac{\ell \omega_0}{c} \left\{ \sin \left[ \theta_H + \frac{\theta_B - \theta_H}{2}(1+u) \right] - \sin \frac{\theta_H + \theta_B}{2} \cos \frac{\theta_B - \theta_H}{2} \right\}$$

получаем интеграл:

$$B_{12}(t, \ell) = \frac{A\pi\delta}{8S} (\theta_B - \theta_H) \int_{-m}^m F(x) [\cos x \cos \psi_* - \sin x \sin \psi_*] dx, \tag{25}$$

где  $\psi_* = \omega_0 \left[ \tau + \frac{\ell}{c} \sin \frac{\theta_H + \theta_B}{2} \cos \frac{\theta_B - \theta_H}{2} \right],$

$$F(x) = \frac{\theta_o^2 c \tilde{G}}{\ell \omega_0} \frac{\left( 1 + \frac{|x + \psi_*|}{\omega_0 \delta} \right)}{\cos \frac{\theta_H + \theta_B}{2}} \left\{ \theta_o^2 + \left[ \arcsin \left( \frac{cx}{\ell \omega_0} + \sin \frac{\theta_H + \theta_B}{2} \cos \frac{\theta_B - \theta_H}{2} \right) \right]^2 \right\}^{-1}$$

$$\tilde{G} = \frac{h^2 \sin \frac{\theta_H + \theta_B}{2}}{\sin \left( \gamma_o - \frac{\theta_H + \theta_B}{2} \right) \left[ \sin^2 \left( \gamma_o - \frac{\theta_H + \theta_B}{2} + \frac{3}{2} \sin \beta \sin 2 \left( \gamma_o - \frac{\theta_H + \theta_B}{2} \right) \right) \right]},$$

$$M = \frac{\omega_o \ell}{c} \cos \frac{\theta_H + \theta_B}{2} \sin \frac{\theta_B - \theta_H}{2}.$$

Так как подынтегральная функция быстро убывает, заменим приближенно интеграл в выражении (25) интегралом:

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(x) [\cos x \cos \psi_* - \sin x \sin \psi_*] dx, \quad (26)$$

произведя вычисления, окончательно получим выражение для пространственно-временной корреляционной функции принимаемых сигналов:

$$B_{12}(\ell, \tau) \approx \frac{A\pi\delta}{4s} e^{-\frac{\ell\omega_0 sh\theta_0 + \sqrt{\left(\frac{c\tau}{\delta}\right)^2 + \left(\frac{\ell}{\delta}\right)^2} sh^2\theta_0}{c}} \times$$

$$\times \frac{\theta_0 h^2 tg \frac{\theta_H + \theta_B}{2} \sqrt{1 + sh^2\theta_0}}{\sin\left(\gamma_0 - \frac{\theta_H + \theta_B}{2} \left[ \sin^2\left(\gamma_0 - \frac{\theta_H + \theta_B}{2}\right) + \frac{3}{2} \sin\beta \sin 2\left(\gamma_0 - \frac{\theta_H + \theta_B}{2}\right) \right]\right)} \times \cos \omega_c \quad (27)$$

Соотношения (20) и (27) могут быть использованы при проведении расчетов на ПЭВМ коэффициента корреляции рассеянных дном сигналов, принимаемых антенной системой ГБО с разнесенными фазовыми центрами. При этом учитываются параметры фазового ГБО  $\omega_0, \delta, \ell, \gamma_0$  и углы наклона рельефа дна  $\beta$  и  $\nu$ . Высокая степень пространственной корреляции при размерах антенной базы  $\ell = (1-5)\lambda$  позволяет сделать вывод о возможности эффективного применения фазового метода для измерения профиля рельефа дна.

## Литература

1. Ольшевский В.В. Статистические свойства морской реверберации. - М.: Наука, 1966.
2. Крон Б., Шерман Ч. Функции пространственной корреляции для различных моделей шума. // Сб. Некоторые проблемы обнаружения сигнала, маскируемого флуктуационной помехой. - М.: Сов. радио, 1965.
3. Распространение волн и подводная акустика. Под ред. Дж. Б. Келлера и Дж. Паладакиса. - М.: Мир, 1980.
4. Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану) : збірник наукових праць / НТЦ ПАС НАН України. – Запоріжжя, 2005, С. 70-77. - ISSN 1815-8277.
5. Теоретические основы создания панорамных гидроакустических систем / А.И. Гончар, О.С. Голод, Ю.А. Ключан, Л.И. Шлычек / Под ред. А.И. Гончара. – Запорожье: , 1999. -290 с. - ISBN-966-02-0675-5.