

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 556.088

doi:10.30987/2658-6436-2022-2-39-48

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГИДРОЛОКАЦИОННОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

Таисия Константиновна Шарафутдинова

ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н.Г. Кузнецова, г. Санкт-Петербург, Россия

sharafutdinova.taya@yandex.ru

Аннотация. Предложен алгоритм восстановления профиля рельефа дна по гидролокационному отображению для различных элементов сложного подводного рельефа. Предложено представление гидролокационного профиля в виде полиномиального уравнения второго порядка. Получены аналитические выражения для восстановления различных форм отражающей поверхности по результатам гидроакустических измерений. Рассмотрено применение описываемого алгоритма восстановления на примере сложного профиля рельефа дна. Показано, что при достижении определенных значений эхорасстояний, происходит возникновение искажений рельефа с нарушением геометрического подобия профилей.

Ключевые слова: эхолот, искажения, сильно-расчлененный рельеф

Для цитирования: Шарафутдинова Т.К. Моделирование процессов измерения параметров и восстановления гидролокационного отображения // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №2 (16). С. 39-48. doi: 10.30987/2658-6436-2022-2-39-48.

Original article

Open Access Article

MODELLING PROCESSES OF MEASURING PARAMETERS AND RECOVERY OF SONAR DISPLAY

Taisiya K. Sharafutdinova

Military Educational and Scientific Centre of the Navy «the N.G. Kuznetsov Naval Academy»;

198514, St. Petersburg, Russia

sharafutdinova.taya@yandex.ru

Abstract. An algorithm for restoring the bottom topography profile from sonar display for various elements of a complex underwater topography is proposed. A sonar profile representation in the form of a second-order polynomial equation is given. Analytical expressions for restoring various forms of reflecting the surface are obtained considering hydroacoustic measurement results. Applying the described restoration algorithm is analysed on the example of a complex profile of the bottom topography. The article shows that when certain values of echo distances are reached, relief distortions occur with a violation of the profile geometric similarity.

Keywords: echo sounder, distortion, severe topography

For citation: Sharafutdinova T. K. Modelling processes of measuring parameters and recovery of sonar display. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 2 (16). pp. 39-48. doi: 10.30987/2658-6436-2022-2-39-48.

Введение

Гидроакустические методы широко используются для освещения морского дна. Гидроакустические системы применяют для морского картирования, поиска навигационных опасностей, при планировании и контроле гидротехнического строительства, при проведении геологических изысканий и эксплуатации подводных аппаратов. К таким

системам относятся однолучевые эхолоты, гидролокаторы бокового обзора (ГБО) и многолучевые эхолоты (МЛЭ).

Однолучевые эхолоты отличаются простотой и надежностью. Они осуществляют дискретную съемку рельефа дна. Многолучевые эхолоты предназначены для площадной съемки на глубинах до 200 м. В МЛЭ используется набор независимых дискретных преобразователей для обеспечения угловой чувствительности в широком веерообразном секторе. Угол полосы МЛЭ варьируется в зависимости от системы, но обычно составляет от 120° до 170° . Гидролокатор бокового обзора измеряет интенсивность отраженного сигнала от морского дна или подводных объектов. Гидролокатор бокового обзора не измеряет глубину, но позволяет получить информацию о рельефе дна или объектов на нем. Он может воспроизводить почти фотографическую картину морского дна, что облегчает интерпретацию полученных снимков.

В районах с выровненным рельефом дна глубины, измеренные с помощью однолучевых эхолотов, ГБО и МЛЭ практически совпадают. Однако при гидролокационном зондировании одних и тех же участков со сложным рельефом дна батиметрические данные, полученные при помощи однолучевых эхолотов, МЛЭ и ГБО будут различны [1 – 5].

Данная проблема актуальна при съемке сильно расчлененного рельефа на больших глубинах. Подобное строение дна наблюдается, например, в подводных каньонах в морях Дальнего Востока. При съемке на сильно расчлененном рельефе глубины, измеренные МЛЭ, оказываются меньше глубин, измеренных однолучевыми эхолотами.

Целью работы является разработка алгоритма восстановления истинного профиля сложного рельефа дна по данным гидролокационного обследования.

Методы и материалы

Искажения отображения сложного рельефа зависят от характера самого рельефа и направленности излучателей гидроакустических систем [6 – 10]. Такие искажения, как правило, не представляют опасности для навигационных целей, потому что искаженные профили оказываются в общем случае смещенными в область меньших глубин. Однако для решения других морских инженерных задач, таких как прокладка трубопроводов, кабелей связи, мониторинг подводного состояния опор буровых платформ – искажения, вносимые вследствие наклонного дна, могут иметь большое значение.

Положение точки фактического отражения ультразвукового импульса на поверхности дна в момент измерения точно не известно. Это связано с тем, что эхолот измеряет не глубину Z , а эхорасстояние R . Акустическая волна отражается от ближайшего к источнику излучения препятствия по нормали. В случае ненаправленного источника излучения точка отражения акустического импульса находится на поверхности нижней части полусферы радиуса R .

Если дно представляет собой плоскую горизонтальную поверхность, то точка отражения находится точно под промерным судном и измеренное эхорасстояние R равно глубине Z . Если дно представляет собой наклонную поверхность, то точка отражения оказывается смещена – $R \neq Z$.

В случае направленного излучателя большая часть энергии передается в главном лепестке. Однако в диаграмме направленности присутствуют области высокой чувствительности за пределами главного лепестка – боковые лепестки. Они являются источником искажений.

Искажения, появляющиеся вследствие наличия боковых лепестков, обусловлены тем, что при наличии отражающей поверхности расположенной ближе к боковым лепесткам обнаружение происходит по боковым лепесткам, а не по главному лепестку. Для эхолота приход отраженного сигнала по боковому лепестку будет происходить тогда, когда угол наклона дна становится больше, чем угол равный половине ширины главного лепестка.

В общем случае на сложном рельефе наблюдается несовпадение по глубине и по плановым координатам (рис. 1).

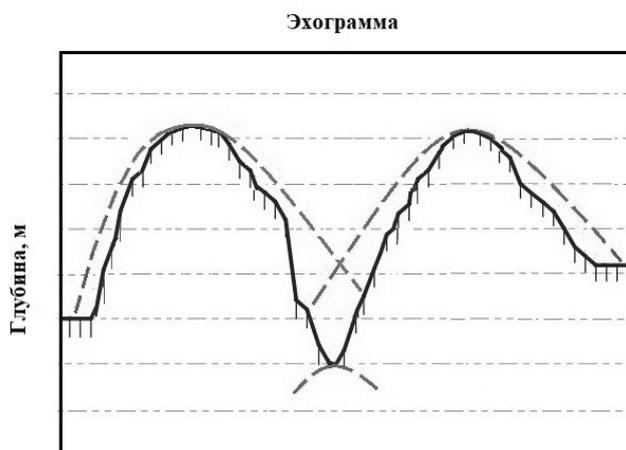


Рис. 1. Формирование гидролокационного отображения на эхограмме
Fig. 1. Sonar image on the echogram

На рис. 2 представлена схема формирования гидролокационного отображения $R(x')$ истинного профиля $Z(x)$.

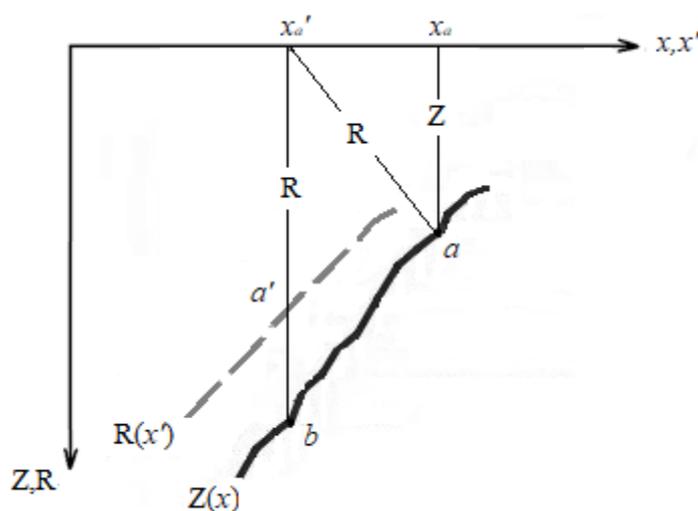


Рис. 2. Формирование гидролокационного отображения на сложном рельефе
Fig. 2. Sonar image on irregular sea floor

На рисунке использованы следующие обозначения: x_a' – горизонтальное положение излучателя эхолота; a – точка отражения акустического импульса от наклонной поверхности дна; x_a – горизонтальное положение точки расположенной над точкой отражения акустического импульса; a' – кажущаяся точка отражения акустического импульса; b – точка на поверхности дна расположенная под излучателем; R – эхорасстояние; Z – глубина точки a . Истинный профиль $Z(x)$ обозначен на рис. 2 сплошной линией, искаженный профиль $R(x')$ – пунктирной линией. Точки положения гидроакустической антенны x' формируют профиль $R(x')$, а точки фактического отражения акустических импульсов x принадлежат истинному профилю $Z(x)$. В общем случае $x' \neq x$.

Известны аналитические выражения [11 – 13] для восстановления истинного профиля рельефа дна по его гидролокационному отображению. Профиль рельефа дна $R(x')$ зафиксированный эхолотом связан с истинным профилем $Z(x)$ системой уравнений вида:

$$\begin{cases} R(x') = Z(x) \left[1 + \left(\frac{dZ}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} \\ x' = x - Z(x) \frac{dZ}{dx} \end{cases} \quad (1)$$

Отсюда по гидролокационному отображению $R(x')$ можно восстановить искомый профиль $Z(x)$:

$$\begin{cases} Z(x) = R(x') \left[1 - \left(\frac{dR}{dx'} \right)^2 \right]^{1/2} \\ x = x' + R(x') \frac{dR}{dx'} \frac{dx'}{dx} \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\frac{dx}{dx'} = 1 - \left(\frac{dR}{dx'} \right)^2 - R(x') \frac{d^2R}{d(x')^2} \quad (3)$$

Используя выражения (1 – 3) и имея набор измеренных эхорасстояний $[R_1, R_2 \dots R_N]$ и горизонтальных положений $[x'_1, x'_2 \dots x'_N]$ можно применить следующий алгоритм для восстановления истинной формы рельефа дна:

- набор точек измерений глубин аппроксимируется полиномом 2-й степени;
- в результате аппроксимации получаем функцию, описывающую гидролокационное отображение $R(x')$ измеренного профиля;
- по известному гидролокационному отображению $R(x')$ восстанавливаем неизвестный истинный профиль $Z(x)$.

Представим профиль $R(x')$ в виде полиномиального уравнения второй степени:

$$R(x') = a(x')^2 + bx' + c, \quad (4)$$

где a, b, c – неизвестные коэффициенты уравнения.

В этом случае для получения выражения для профиля $R(x')$ задача сводится к нахождению неизвестных коэффициентов a, b, c . Первая производная от функции (4):

$$\frac{dR}{dx'} = 2ax' + b. \quad (5)$$

Вторая производная от функции (4):

$$\frac{d^2R}{d(x')^2} = 2a. \quad (6)$$

Тогда подставив (4), (5) и (6) в выражение (3) получим:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dx'} &= 1 - (2ax' + b)^2 - 2a[a(x')^2 + bx' + c], \\ \frac{dx'}{dx} &= \left\{ 1 - (2ax' + b)^2 - 2a[a(x')^2 + bx' + c] \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

После подстановки (7) в систему (2) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} Z(x) = [a(x')^2 + bx' + c][1 - (2ax' + b)^2]^{1/2} \\ x = x' + \frac{[a(x')^2 + bx' + c](2ax' + b)}{1 - (2ax' + b)^2 - 2a[a(x')^2 + bx' + c]} \end{cases} \quad (8)$$

Предположим, что известны эхорасстояния R_1, R_2, R_3 и горизонтальные положения x'_1, x'_2, x'_3 как минимум трех точек. Здесь $R_1 = R(x'_1), R_2 = R(x'_2), R_3 = R(x'_3)$. Тогда решая систему уравнений:

$$\begin{cases} a(x'_1)^2 + bx'_1 + c = R_1 \\ a(x'_2)^2 + bx'_2 + c = R_2, \\ a(x'_3)^2 + bx'_3 + c = R_3 \end{cases} \quad (9)$$

можно найти коэффициенты a, b, c :

$$\begin{aligned} a &= \frac{R_3 - \frac{x'_3(R_2 - R_1) + x'_2 R_1 - x'_1 R_2}{x'_2 - x'_1}}{x'_3(x'_3 - x'_1 - x'_2) + x'_1 x'_2}; \\ b &= \frac{(R_2 - R_1)}{x'_2 - x'_1} - a(x'_2 + x'_1); \\ c &= \frac{x'_1 R_2 - x'_2 R_1}{x'_1 - x'_2} + ax'_1 x'_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Подстановка коэффициентов (10) в уравнение (4) позволяет получить выражение для функции $R(x')$. Тогда, используя найденные коэффициенты a, b, c и систему уравнений (8), можно получить аналитическое выражение для функции $Z(x)$.

Соответственно при большей дискретности съемки увеличивается количество измеренных точек и уточняются коэффициенты a, b, c и сама функция $R(x')$. Также выбранный полином второй степени является не единственным способом задания функции $R(x')$

Необходимо понимать, что рассмотренный выше случай самый простой. В общем случае изменяется положение двух координат (x, y) . В этом случае гидролокационное отображение становится функцией двух переменных $R(x', y')$.

Результаты

Рассмотрим восстановление истинного профиля $Z(x)$ при различных формах рельефа дна.

Вариант I – отражение от профиля $Z(x)$, имеющего форму выпуклой наклонной кривой линии. Гидролокационные отображения от выпуклых форм рельефа растягиваются в горизонтальном направлении. На рис. 3 искаженный профиль $R(x')$ смещен в сторону меньших глубин по отношению к истинному профилю $Z(x)$. Сохраняется выпуклая форма профиля. По данному варианту происходит формирование отражений от притопленных буев, затонувших объектов и т.п. Параметры профиля $R(x')$ удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} 2a < 0 \\ 1 - (2ax' + b)^2 - 2a[a(x')^2 + bx' + c] > 0. \end{cases} \quad (11)$$

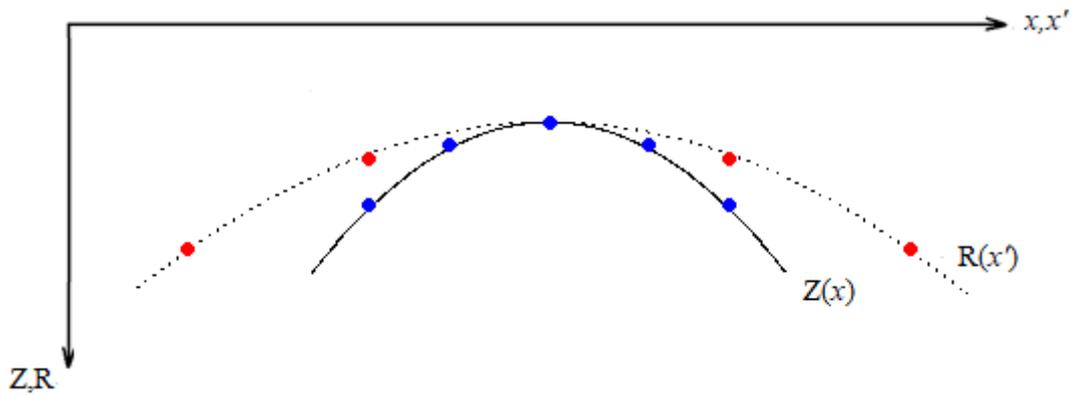


Рис. 3. Отражение от выпуклого профиля рельефа дна
Fig. 3. Sonar image of convex terrain

Как следует из выражения (7) при перемещении в область меньших глубин связь между точками положения гидроакустической антенны x' формирующими профиль $R(x')$ и точками фактического отражения акустических импульсов x принадлежащих профилю $Z(x)$ выражается неравенством $x' < x$. При перемещении в противоположном направлении – $x' > x$. В точке максимума $x' = x$.

Вариант II – отражение от точечного объекта. Вариант II представляет собой частный случай варианта I, при котором профиль $Z(x)$ вырождается в точку с координатами (x, z) . В этом случае нарушается геометрическое подобие истинного положения объекта и его гидролокационного отображения. Профиль $R(x')$ в этом случае имеет вид выпуклой кривой.

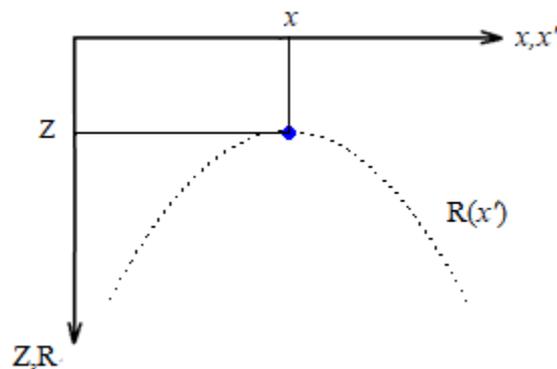


Рис. 4. Отражение от точечного объекта
Fig. 4. Sonar image of a point object

Для измерений, произведенных из точки находящейся непосредственно над объектом измерения, справедливо следующее выражение:

$$\begin{cases} x = x' \\ Z(x) = R(x') \end{cases} \quad (12)$$

В остальных случаях $x' \neq x$. По мере приближения излучателя к подводному объекту положение антенны определяется неравенством $x' < x$. По мере удаления излучателя от объекта определяется неравенством $x' > x$.

Вариант III – отражение, при котором профили $Z(x)$ и $R(x')$ имеют вид вогнутых кривых линий. Такой случай возникает при условии отражения от вогнутых форм подводного рельефа, если центр кривизны поверхности отражения находится над поверхностью

измерения (рис. 5). Данная ситуация характерна для работ выполняемых на мелководье. У гидролокационного отображения сохраняется вогнутая форма профиля. Искаженный профиль $R(x')$ смещен в сторону меньших глубин.

В этом случае параметры измеренного профиля $R(x')$ удовлетворяют условию:

$$\begin{cases} 2a > 0 \\ 1 - (2ax' + b)^2 - 2a[a(x')^2 + bx' + c] > 0 \end{cases} \quad (13)$$

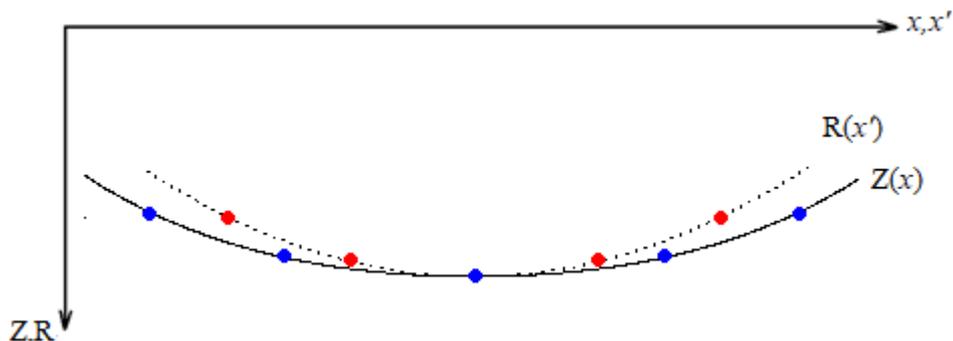


Рис. 5. Отражение от вогнутого пологого профиля
Fig. 5. Sonar image of slope terrain

Вариант IV соответствует условию, при котором нарушается геометрическое подобие кривых $Z(x)$ и $R(x')$. Профиль $Z(x)$ имеет форму вогнутой кривой, тогда как профиль $R(x')$ имеет форму выпуклой кривой (рис. 6). Гидролокационный профиль расположен ниже истинного профиля рельефа дна. Данный вариант возможен при условии отражения от вогнутых форм подводного рельефа, если центр кривизны поверхности отражения находится ниже поверхности измерения. Подобная ситуация характерна для работ выполняемых на больших глубинах.

В таком случае параметры профиля $R(x')$ удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} 2a < 0 \\ 1 - (2ax' + b)^2 - 2a[a(x')^2 + bx' + c] < 0 \end{cases} \quad (14)$$

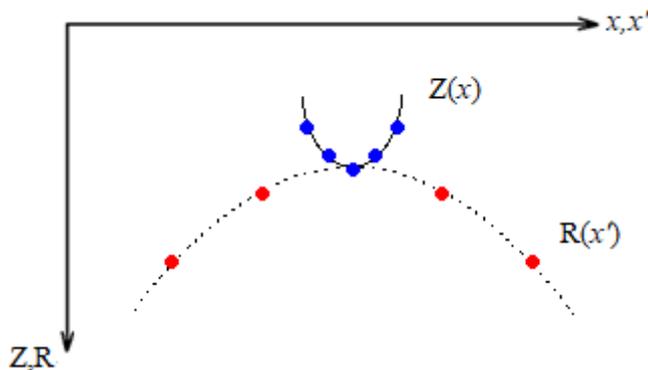


Рис. 6. Отражение от вогнутого профиля
Fig. 6. Sonar image of concave terrain

Сложный рельеф представляет собой сочетание рассмотренных выше отдельных форм рельефа. Ниже показаны два случая с присутствием вогнутых и выпуклых форм рельефа дна. На примере сложного рельефа показано применение описываемого алгоритма восстановления профиля рельефа дна.

По измеренным глубинам аппроксимирована функция $R(x')$. Функция $R(x')$ известна в любой точке. Функция $R(x')$ представляет собой известный искаженный профиль подводного рельефа.

Функция $Z(x)$ представляющая собой истинный профиль подводного рельефа является неизвестной. По известному искаженному профилю $R(x')$ требуется восстановить неизвестный истинный профиль $Z(x)$.

На рис. 7 представлена модель сложного рельефа состоящая из двух выпуклых и одной пологой вогнутой формы рельефа. Как видно из рис. 7 кажущиеся углы наклона искаженного профиля меньше фактических углов. Точки кажущегося отражения смещены от истинного положения в сторону меньших глубин. Искаженный профиль имеет более гладкую форму с плавными переходами в сравнении с фактическим профилем.

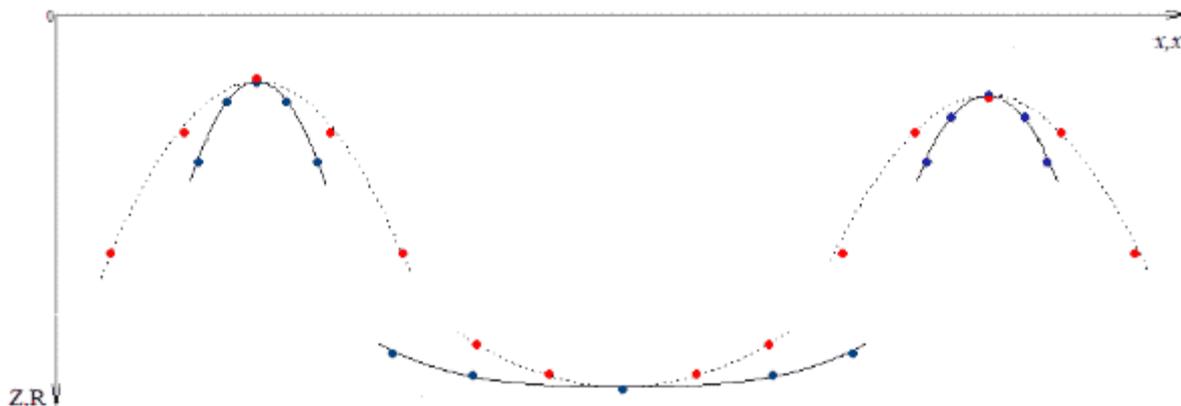


Рис. 7. Искаженный и истинный профиль дна
 Fig. 7. Bottom topography and its sonar image

В силу особенностей искажений, возникающих при отражении от вогнутых объектов, смоделирована ситуация с нарушением геометрического подобия профилей $R(x')$ и $Z(x)$. На приведенном рис. 8 видно, что при таких условиях гидролокационное отображение существенно искажено. На рис. 8 профиль $R(x')$ обозначен пунктирной линией, профиль $Z(x)$ – сплошной.

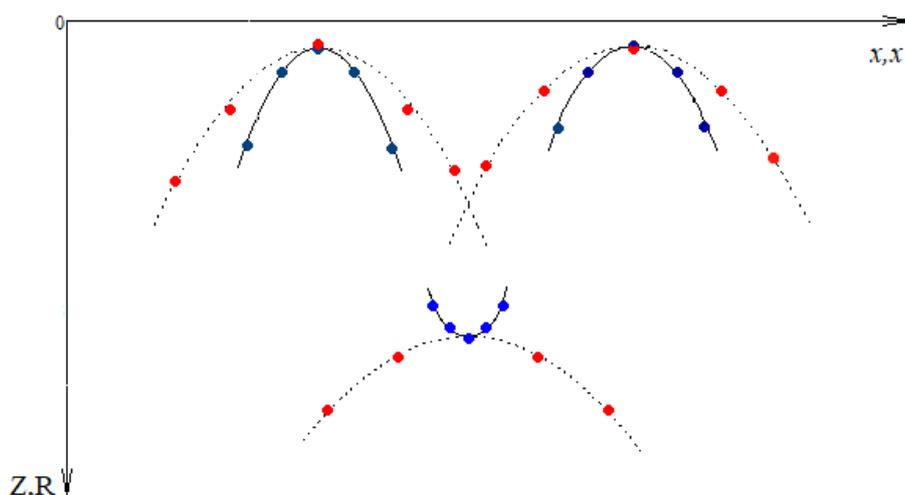


Рис. 8. Искаженный и истинный профиль дна
 Fig. 8. Bottom topography and its sonar image

Как видно из рис. 8 при определенных значениях эхорасстояний R и радиуса кривизны вогнутых форм рельефа наступают искажения профиля с нарушением геометрического подо-

бия профилей.

В случае вогнутых форм рельефа на соответствующих гидролокационных отображениях могут уменьшаться не только горизонтальные, но и вертикальные размеры этих морфоструктур. На рис. 8 эти искажения можно проследить в виде пересекающихся участков записи. Искажающее влияние возрастает с увеличением расстояния между приемно-излучающей системой и дном океана.

Заключение

При съемке сложного рельефа дна гидроакустическими методами могут возникать искажения, выражающиеся в несовпадении истинного профиля дна и его гидролокационного отображения. Характер и величина искажений зависят от параметров излучателя, формы отражающей поверхности и расстояния между излучателем и отражающей поверхностью.

Предложенный алгоритм восстановления профиля предназначен для исследований в областях с сильно расчленённым рельефом. Применение предложенного алгоритма дает возможность восстановления истинного профиля дна по его гидролокационному отображению. Учет особенностей характерных форм рельефа и эхорасстояний позволяет определить в каждом случае характер искажения и восстановить истинный профиль по предложенному алгоритму.

Список источников:

References:

1. Marks K.M., Smith W.H.F. An uncertainty model for deep ocean single beam and Multibeam echo sounder data, *Mar. Geophys. Res.* 2009. doi 10.1007/s11001-008-9060-у.
2. Попко А.О. Учет неопределенности съемки дна многолучевым эхолотом при формировании гидроакустических образов рельефа для целей навигационного ориентирования // Национальная ассоциация ученых. 2015. т. 10. с. 76-80.
3. Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Степанов А.В. Оценка сходимости глубин при площадной съемке рельефа дна многолучевым эхолотом и интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // Журнал Радиоэлектроники. № 4. 2017.
4. Голод О.С., Гончар А.И., Зубченко Э.С. Модель погрешности съемки батиметрического поля с помощью интерферометрического гидролокатора бокового обзора // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану). 2005. №2.
5. R. Hare «Depth and position error budgets for multibeam echosounding» *International Hydrographic Review, Monaco, LXXII(2), September 1995.*
6. Tuser M., Balk H., Mrkvicka T., Frouzova J., Cech M., Muska M., Kubecka J. Validation of current acoustic dead-zone estimation methods in lakes with strongly sloped bottoms. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 9. 2011. p. 507-514.
7. Biffard B., Bloomer S., Chapman R., Preston J. Single-beam seabed classification: direct methods of classification and the problem of slope. *Conf. University of Bath.* 2005. p. 227-232.
8. Ugwuoti A., Ojinnaka O., Etuonevbe A. Effect of Sonar Beamwidth and Slopping Sea Bed on the Accuracy of Bathymetric Survey. *FIG Congress.* 2018.
1. Marks K.M., Smith W.H.F. An uncertainty model for deep ocean single beam and Multibeam echo sounder data, *Mar. Geophys. Res.* 2009. doi: 10.1007/s11001-008-9060-у.
2. Popko A.O. Accounting for the Uncertainty of Bottom Survey with a Multi-Beam Echo Sounder in the Formation of Hydroacoustic Terrain Images for Navigational Orientation. *National Association of Scientists.* 2015;10:76-80.
3. Krivtsov A.P., Smolyaninov I.V., Elbakidze A.V., Stepanov A.V. An Estimate of the Convergence of the Depth for an Area Survey of the Bottom Relief by a Multi-Beam Echo Sounder and an Interferometric Sidescan Sonar. *Journal of Radioelectronics.* 2017;4.
4. Golod O.S., Gonchar A.I., Zubchenko E.S. Error Model of Surveying a Bathymetric Field Using an Interferometric Sidescan Sonar. *Hydroacoustic Journal.* 2005;2.
5. R. Hare «Depth and position error budgets for multibeam echosounding» *International Hydrographic Review, Monaco, LXXII(2), September 1995.*
6. Tuser M., Balk H., Mrkvicka T., Frouzova J., Cech M., Muska M., Kubecka J. Validation of current acoustic dead-zone estimation methods in lakes with strongly sloped bottoms. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 9. 2011. p. 507-514.
7. Biffard B., Bloomer S., Chapman R., Preston J. Single-beam seabed classification: direct methods of classification and the problem of slope. *Conf. University of Bath.* 2005. p. 227-232.
8. Ugwuoti A., Ojinnaka O., Etuonevbe A. Effect of Sonar Beamwidth and Slopping Sea Bed on the Accuracy of Bathymetric Survey. *FIG Congress.* 2018.

9. Song G., Lo S., Perry J. Underwater Slope Measurement Using a Tilted Multibeam Sonar Head. IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING. 2014. Vol. 39. p. 419-429.
10. Фирсов Ю.Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров. Учебное пособие. ГМА. 2008. 235 с.
11. Тезиков А.Л. Методы и средства морской гидрографической съемки: Учеб. Пособие. М.: В/О «Мортехинформреклама», 1990. 52 с.
12. Афонин А.Б., Лутков С.А., Тезиков А.Л. Прибрежный промер. Методы гидрографических измерений. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. 84 с.
13. Лутков С.А., Тезиков А.Л. Исследование искажений гидролокационного отображения элементов сложного подводного рельефа // Морские интеллектуальные технологии. 2021. т. 4. № 2. с. 97-101.
9. Song G., Lo S., Perry J. Underwater Slope Measurement Using a Tilted Multibeam Sonar Head. IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING. 2014. Vol. 39. p. 419-429.
10. Firsov Yu.G. Fundamentals of Hydroacoustics and the Use of Hydrographic Sonars. Petersburg: Nestor Istoriya; 2010.
11. Tezikov A.L. Methods and Means of Marine Hydrographic Survey. Moscow: V/O «Mortekhinformreklama»; 1990.
12. Afonin A.B., Lutkov S.A., Tezikov A.L. Coastal Measure. Methods of Hydrographic Measurements. Saint Petersburg: Publishing house of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 2013.
13. Lutkov S.A., Tezikov A.L. Investigation of Distortions in the Sonar Display of Elements of Complex Underwater Terrain. Marine Intellectual Technologies. 2021;4(2):97-101.

Информация об авторах

Таисия Константиновна Шарафутдинова
преподаватель кафедры Радиоэлектроники ВМПИ
ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н.Г. Кузнецова

Information about authors:

Taisiya Konstantinovna Sharafutdinova
Faculty instructor of the Department «Radioelectronics»
of Military Educational and Scientific Centre of the Navy
«the N.G. Kuznetsov Naval Academy»

Статья поступила в редакцию 21.03.2022; одобрена после рецензирования 04.04.2022; принята к публикации 07.04.2022.

The article was submitted 21.03.2022; approved after reviewing 04.04.2022; accepted for publication 07.04.2022.

Рецензент – Тезиков А.Л., доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.

Reviewer – Tezikov A.L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping.