

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.7>

УДК: 551.463.621.391

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМЕТРИЧЕСКИМ ГИДРОЛОКАТОРОМ БОКОВОГО ОБЗОРА

В.И. Каевицер, А.П. Кривцов, И.В. Смольянинов, А.В. Элбакидзе

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2022 г.

Аннотация. В работе рассмотрен алгоритм коррекции батиметрических измерений при построении детальной цифровой карты рельефа донной поверхности по данным полосовой съемки интерферометрического гидролокатора бокового обзора (ИГБО). Возможности предлагаемого алгоритма продемонстрированы на основе математического моделирования фазоразностных измерений ИГБО для многослойных звукорассеивающих плоскостей и применения результатов моделирования для коррекции данных формирования цифровой модели рельефа морского дна. Отмечена применимость алгоритма коррекции данных батиметрии для калибровки антенных трактов интерферометрических гидролокаторов бокового обзора и измерения звукорассеивающих слоев в водной среде.

Ключевые слова: Интерферометрический гидролокатор бокового обзора, фазоразностные измерения, акустическое изображение и рельеф донной поверхности, математическое моделирование алгоритма, звукорассеивающие слои.

Финансирование: Государственное задание № 075-01133-22-00

Автор для переписки: Смольянинов Илья Вячеславович, ilia159@mail.ru

Введение

Исследования рельефа дна морей и океанов выполняется с помощью широкого набора технических средств, к числу которых относятся и ИГБО, позволяющих одновременно получать высококачественные акустические изображения донной поверхности и цифровую карту глубин в широкой полосе обзора [1-6]. В дальнейшем эти данные могут быть использованы для исследования морфологии донной поверхности, общего анализа рельефа дна, картографии и решения других прикладных задач.

Получаемые ИГБО батиметрические данные, как правило, содержат различного рода искажения, влияющие на точность построенных на ЭВМ батиметрических карт. Наиболее распространенными видами искажений являются:

Искажения, вызванные погрешностью определения угла крена ИГБО во время съемки. Присутствие этой погрешности при вычислениях глубин приводит к тому, что синтезируемый рельеф в пределах полосы обзора имеет дополнительный наклон по углу места.

Искажения, вызванные погрешностями в определении уровня водоема. Такие погрешности обычно возникают из-за не учета изменения уровня моря вследствие приливов. В реках и других закрытых водоемах изменение уровня может быть вызвано сбросом воды из водохранилищ, проливными дождями и т.д. Эти погрешности приводят к тому, что батиметрические данные имеют дополнительную подставку к глубине. В этом случае при выкладке данных на карту получаемое изображение рельефа в местах пересечения отдельных полос батиметрии имеет ступенчатую структуру.

Искажения, вызванные погрешностями в определении базы интерферометра, угла наклона и фазового набега в приемных каналах интерферометра.

Отмеченные искажения эффективно устраняются с помощью алгоритмов, рассмотренных в работе [6], использующих в качестве опорной сетки измерения глубины под судном по первому вступлению эхосигнала гидролокатора

бокового обзора, отмеченному стрелкой на рисунке 1. В данной работе рассмотрен способ и разработан эффективный алгоритм, позволяющий измерить и компенсировать искажения, указанные в п.3. Приведены возможности предложенного способа для калибровки интерферометра и обнаружения звукорассеивающих слоев [7,8] в морях и океанах.

Анализ результатов съемки дна, получаемых ИГБО в реальном времени и разработка алгоритма коррекции вычислений рельефа дна, обусловленных ошибками параметров интерферометра

ИГБО производит построчную полосовую съемку для одновременного получения высококачественных акустических изображений морского дна и вычисления глубин в полосе обзора [1-6]. В качестве примера на рисунке 1 показан фрагмент съемки ИГБО в реальном времени. Справа приведено акустическое изображение (стрелкой помечена граница водной толщи и дна). Слева приведена интерферометрическая разность фаз, являющаяся основой для построения рельефа дна. Отметим, что съемка проведена на участке со слабо выраженным рельефом при глубине около 100м.

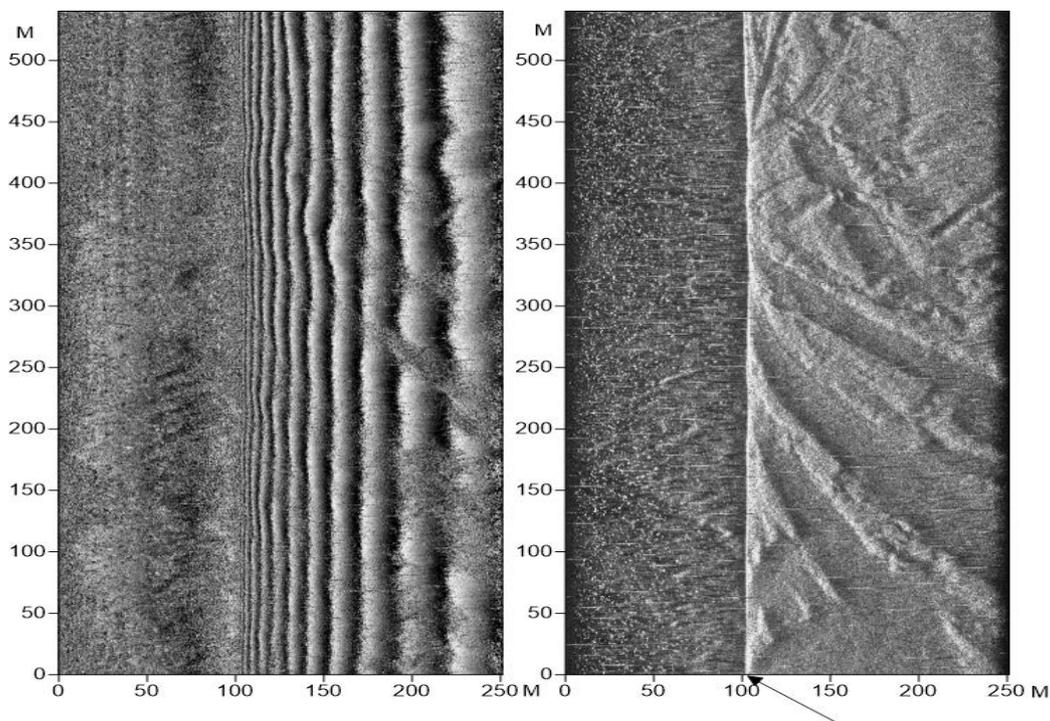


Рис. 1. Пример результатов, получаемых ИГБО в реальном времени

Интерферометрическую разность фаз для плоского дна в строке данных съемки, соответствующей одному циклу излучения и приема сигнала, можно записать в следующем виде:

$$\varphi(t) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\alpha(t) + \beta) + \Delta\varphi_0, \quad (1)$$

где: $\alpha(t) = \arccos\left(\frac{2H}{ct}\right)$, здесь H – глубина под судном, c – скорость звука, t – время прихода эхосигнала, β – угол наклона интерферометра, d – база интерферометра, λ – длина волны акустического сигнала, $\Delta\varphi_0$ – аппаратурная разность фаз сигналов в приемных каналах интерферометра. На рисунке 2 в качестве примера приведен график интерферометрической фазы в зависимости от времени прихода эхосигналов для глубины $H_0=100$ м. Остальные параметры соответствуют данным съемки, приведенным на рисунке 1.

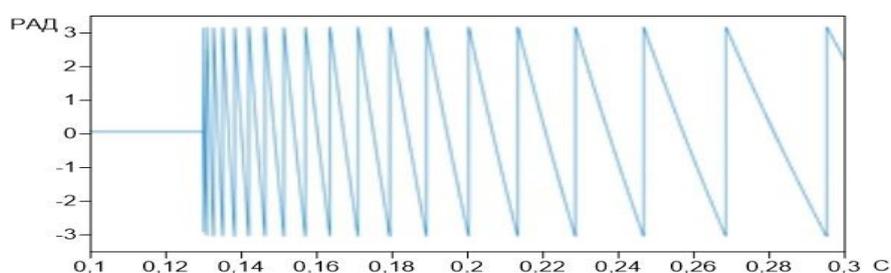


Рис. 2. График интерферометрической разности фаз в зависимости от времени прихода эхосигналов для $H_0=100$ м

На приведенном графике видно, что интерферометрическая разность фаз имеет вид сигнала с частотной модуляцией. Если рассматривать интерферометрическую фазу $\varphi(t)$ как сигнал, зависящий от глубины H как от параметра, то двумерная автокорреляционная функция (АКФ) такого сигнала запишется в следующем виде:

$$\rho(H_0, H) = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(H_0, t) \varphi(H, t) dt, \quad (2)$$

где T – время одного цикла приема отраженного сигнала ИГБО.

При фиксированном значении H_0 нормированная АКФ соответственно имеет вид функции, зависящей только от глубины H :

$$\rho_n(H) = \frac{\int_0^T \varphi(H_0, t) \varphi(H, t) dt}{\int_0^T \varphi^2(H_0, t) dt}.$$

На рисунке 3 представлен модуль этой функции, вычисленный в диапазоне глубин от 75 до 125 метров при наличии звукорассеивающего слоя на глубине $H_0 = 100$ м.

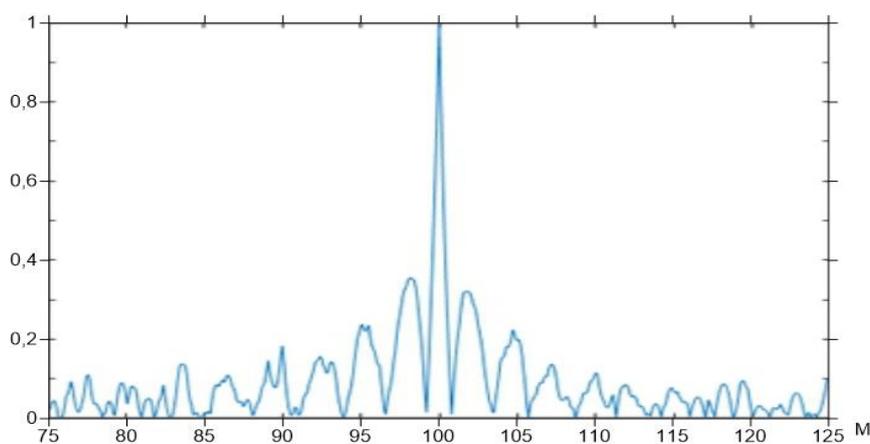


Рис. 3. Модульное значение нормированной АКФ в зависимости от глубины при наличии звукорассеивающего слоя на глубине $H_0 = 100$ м

Приведенный на рисунке 3 график показывает, что наличие рассеивающей поверхности на заданной глубине хорошо фиксируется при применении рассмотренного алгоритма (1-2). Если в процессе съемки имеется несколько рассеивающих слоев на различных глубинах, то они также выделяются. Отметим, что разрешающая способность алгоритма увеличивается при увеличении базы интерферометра.

Возможности применения разработанного алгоритма по реальным данным, полученным ИГБО, приведены на рисунке 4.

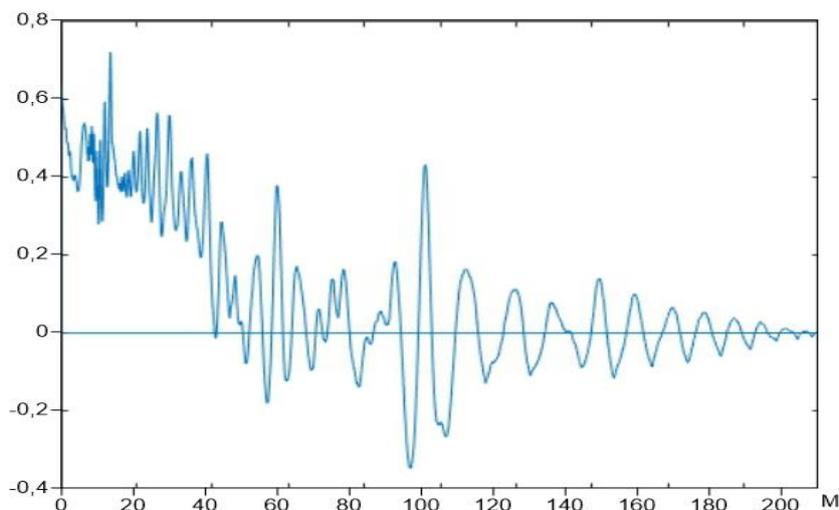


Рис. 4. Пример работы алгоритма с экспериментальными измерениями

Как видно на рисунке 4 хорошо выделяется пик в районе 100м, соответствующий глубине под судном. Кроме этого, следует отметить и наличие характерных пиков в районе глубин 60м и 18м. Если посмотреть на рисунок 1, то можно видеть, что в водной толще на акустическом изображении при высоком уровне шумов никаких рассеивающих слоев не видно, а на интерферометрическом – просматриваются горизонтальные полосы, подтверждающие наличие слабых звукорассеивающих слоев. Анализ данных по профилю скорости звука также показывает, что на глубинах около 20 метров наблюдается резкое изменение характеристик водной среды.

Рассмотрим более подробно результат применения алгоритма для коррекции батиметрических измерений. По данным ГБО глубина под судном, отмеченная стрелкой, составляет 102м, а по измерениям с помощью разработанного алгоритма 100м. Разница в 2м возникает из-за ошибок, возникающих вследствие неточностей измеренных значений базы, угла наклона интерферометра и аппаратурной разности фаз сигналов в приемных каналах интерферометра. На точность вычисления глубины также оказывают влияние погрешности в измерении профиля скорости звука. Погрешность $\Delta\varphi_0$ вносит основной вклад в ошибку измерений и для приведенного случая равна примерно 45° . Отметим, что рассмотренные неточности заданных параметров интерферометра не меняются в процессе проведения гидролокационной съемки, поэтому ошибка $\Delta\varphi_0=45^\circ$ может считаться калибровочным значением и учтена при построении цифрового рельефа дна.

Таким образом разработанный алгоритм может быть использован для калибровки ИГБО.

Заключение

Предложен способ и разработан алгоритм обнаружения и вычисления положения звукорассеивающих слоев в водоемах с помощью интерферометра бокового обзора. Проведено опробование алгоритма на математических моделях, подтвердившее его эффективность для решения поставленной задачи.

Применение алгоритма при обработке экспериментальных данных позволило выявить и оценить погрешности вычислений глубин, измеренных ИГБО, и способы их коррекции при построении цифрового рельефа дна.

Показана возможность применения разработанного алгоритма для обнаружения и измерения структуры звукорассеивающих слоев в морской среде.

Финансирование: Государственное задание № 075-01133-22-00

Литература

1. Долотов С.А., Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В. Применение интерферометрического ГБО с ЛЧМ зондирующим сигналом для исследования морского дна. *Известия ТРТУ*. 2004. №5. С.268-273.
2. Каевицер В.И., Разманов В.М., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Долотов С.А. Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией. *Радиотехника*. 2008. №8. С.35-42.
3. Каевицер В.И., Разманов В.М. Дистанционное зондирование морского дна гидролокационными системами со сложными сигналами. *Успехи физических наук*. 2009. Т.179. №2. С.218-224.
4. Болдинов Р.О., Скнар А.В., Тощов С.А. К вопросу о применении алгоритмов построения рельефа дна в интерферометрическом гидролокаторе бокового обзора «НЕМАН ИГБО-500». *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2017. №2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/10/text.pdf>
5. 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* [электронный журнал]. 2017. №4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr17/2/text.pdf>
6. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Алгоритмы коррекции данных батиметрии при формировании цифровой карты рельефа

донной поверхности на регулярной сетке. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2018. №5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may18/9/text.pdf>

7. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана. *Акустический журнал*. 1999. Т.45. №4. С.437-444. URL: http://www.akzh.ru/pdf/1999_4_437-444.pdf
8. Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Федоров С.В. Звукорассеивающие слои черного моря по данным ADCP – наблюдений. *Акустический журнал*. 2017. Т.63. №5. С.513-522. URL: http://www.akzh.ru/pdf/2017_5_513-522.pdf

Для цитирования:

Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Алгоритм коррекции батиметрических измерений интерферометрическим гидролокатором бокового обзора. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.7>