

УДК 551.463.621.391

АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ БАТИМЕТРИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЦИФРОВОЙ КАРТЫ РЕЛЬЕФА ДОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА РЕГУЛЯРНОЙ СЕТКЕ

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 3 мая 2018 г.

Аннотация: В работе рассмотрены алгоритмы коррекции данных батиметрии, применяемые при построении детальной цифровой карты рельефа донной поверхности на регулярной сетке по данным полосовой съемки интерферометрического гидролокатора бокового обзора (ИГБО). Возможности предлагаемых алгоритмов продемонстрированы на примере формирования цифровой модели рельефа (ЦМР) небольшого участка морского дна. Отмечена применимость алгоритмов коррекции данных батиметрии для калибровки интерферометрических гидролокаторов бокового обзора по углу крена.

Ключевые слова: гидроакустические системы, интерферометрический гидролокатор бокового обзора, батиметрия морского дна, рельеф донной поверхности, цифровая модель рельефа.

Abstract: The paper considers the correction algorithms of bathymetry data used for the construction of a detailed digital map of the sea-bottom relief on a regular grid according to the data of the interferometric side-scan sonar (ISSS). The capabilities of the proposed algorithms are demonstrated by the example of the formation of a digital elevation model (DEM) of a small section of the sea floor. It has been noted the applicability of the correction algorithm of the roll angle bathymetry data for calibration of the interferometric side-scan sonar.

Key words: sonar systems, interferometric side-scan sonar, sea floor bathymetry, sea-bottom relief, digital elevation model.

1. Введение

Изучение рельефа дна водных бассейнов является важной частью любых гидрографических исследований. Процесс сбора данных о глубинах (батиметрическая съемка) выполняется с помощью широкого набора технических средств, к числу которых относятся и ИГБО, осуществляющие полосовую съемку донной поверхности в широкой полосе обзора [1-3]. Получаемые после обработки результаты батиметрической съемки представляют собой набор данных, содержащих информацию о распределении глубин в зоне обследования. В дальнейшем эти данные могут быть использованы для исследования морфологии донной поверхности, общего анализа рельефа дна, картографии и решения других прикладных задач.

Технология создания батиметрических карт включает в себя процесс формирования цифровой модели рельефа (ЦМР), которая является средством цифрового представления пространственных объектов в виде трехмерных данных [4,5]. К числу наиболее популярных видов цифровых моделей относится матричное представление батиметрических данных. В этом случае матрица рельефа является двумерной сеткой ячеек с заданным расстоянием между ними и привязанную к координатам местности, в ячейках которой хранятся значения отметок глубин. Достоинством такой ЦМР является возможность быстрого доступа к ее элементам. К недостаткам следует отнести большой объем хранимой избыточной информации.

Получаемые ИГБО батиметрические данные, предназначенные для построения ЦМР донной поверхности, 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.

В реальных условиях гидролокационной съемки, как правило, имеются причины для возникновения и других типов искажений. Однако наиболее часто встречаются отмеченные два вида, как по отдельности, так и в комбинации друг с другом. Поэтому в большинстве случаев при формировании ЦМР и получения качественного изображения рельефа донной поверхности необходимо выполнять предварительную коррекцию данных батиметрии для устранения влияния отмеченных факторов.

2. Алгоритмы коррекции данных батиметрии

Технология создания цифровой батиметрической карты на регулярной сетке предполагает формирование шаблона карты в виде прямоугольной матрицы с заданным пространственным шагом между узлами, в которые будут заноситься отсчеты глубин. У каждой узловой ячейки определены ее географические координаты и в каждом узле могут храниться данные нескольких промеров глубины. Результирующий отсчет глубины в узле вычисляется как среднее значение этих промеров.

Исходными данными, наносимыми на карту, являются наборы отсчетов глубин в виде отдельных полос батиметрии. Каждая полоса формируется по информации одного файла данных гидролокационного зондирования. При площадной съемке полосы частично накладываются друг на друга и образуют сплошное поле, покрывающее обследуемую область водной акватории.

Изначально получаемые в зоне сканирования ИГБО отсчеты глубин имеют нерегулярное расположение точек в полосе обзора. Поэтому для дальнейшей компьютерной обработки эти данные необходимо подготовить, а именно в пределах полосы обзора представить в виде непрерывной поверхности полученной путем интерполяции измеренных ГБО отсчетов глубин к узлам сетки. В настоящее время существует целый ряд методов позволяющих решить подобную задачу [4,5].

Для возможности использования предлагаемых алгоритмов коррекции каждый отсчет батиметрии в пределах полосы обзора должен быть представлен четверкой чисел (m, n, z, x) . Здесь m и n задают номер ячейки (узла) на ЦМР формируемой карты, x – отсчет горизонтальной дальности, z – отсчет глубины (измеряемая гидролокатором наклонная дальность r связана с x и z соотношением: $r^2 = x^2 + z^2$).

Рассмотрим сначала алгоритм коррекции данных батиметрии по углу крена. Пусть у нас имеется система пересекающихся полос батиметрических данных, отсчеты глубин которых выкладываются на карту. Будем считать, что в выкладываемых данных присутствуют искажения батиметрии первого типа. Это приводит к тому, что в местах пересечения отдельных полос наблюдаются нестыковки по глубинам из-за погрешностей в определении угла крена ГБО. Требуется вычислить эти искажения (поправки к углу крена $\Delta\beta^{[i]}$, где i – номер полосы съемки) и скорректировать исходные данные перед их выкладкой на карту.

Предлагаемый способ вычисления поправок по крену базируется на вычислении параметров $k^{[i]}$, минимизирующих следующее выражение:

$$F(k^{[1]}, \dots, k^{[N]}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \sum_{m,n} \left[\left(z_{m,n}^{[i]} + k^{[i]} x_{m,n}^{[i]} \right) - \left(z_{m,n}^{[j]} + k^{[j]} x_{m,n}^{[j]} \right) \right]^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{m,n} \left[\left(z_{m,n}^{[i]} + k^{[i]} x_{m,n}^{[i]} \right) - \hat{z}_{m,n} \right]^2 \quad (1)$$

Здесь верхний индекс в квадратных скобках обозначает номер полосы батиметрических данных. $z_{m,n}^{[i]}$, $x_{m,n}^{[i]}$ - отсчеты глубины и горизонтальной дальности в ячейке номер (m, n) на формируемой карте для полосы батиметрии под номером i . N - число полос батиметрии участвующих в обработке. $\hat{z}_{m,n}$ - уже существующий отсчет глубины на карте (если до этого наносились данные). Ранее нанесенные на карту отсчеты глубин участвуют в обработке, но никак не корректируются. Суммирование ведется только по узлам карты, в которых присутствуют одновременно данные батиметрии для полос с номерами i и j , а также в узлах пересечения i - ой полосы с данными ранее нанесенными на карту.

Коэффициенты $k^{[i]}$, минимизирующие функцию (1), находим путем решения системы линейных уравнений:

$$\frac{\partial F(k^{[1]}, \dots, k^{[N]})}{\partial k^{[i]}} = 0, \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Если представить систему уравнений (2) в развернутом виде как:

$$\begin{cases} a_{11}k^{[1]} + a_{12}k^{[2]} + \dots + a_{1N}k^{[N]} = b_1 \\ a_{21}k^{[1]} + a_{22}k^{[2]} + \dots + a_{2N}k^{[N]} = b_2 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_{N1}k^{[1]} + a_{N2}k^{[2]} + \dots + a_{NN}k^{[N]} = b_N \end{cases} \quad (3)$$

то после преобразований для коэффициентов a_{ij} и свободных членов b_i получим следующие соотношения:

$$a_{ii} = \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^N \sum_{m,n} x_{m,n}^{[i]} x_{m,n}^{[i]} + \sum_{m,n} x_{m,n}^{[i]} x_{m,n}^{[i]}$$

$$a_{ij} = - \sum_{m,n} x_{m,n}^{[j]} x_{m,n}^{[i]} \quad (\text{для } i \neq j)$$

$$b_i = - \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^N \sum_{m,n} (z_{m,n}^{[i]} - z_{m,n}^{[j]}) x_{m,n}^{[i]} + \sum_{m,n} (z_{m,n}^{[i]} - \hat{z}_{m,n}) x_{m,n}^{[i]}$$

Суммирование по индексу j здесь проводится по местам пересечения i – ой полосы батиметрических данных со всеми другими полосами. Так, например, в формуле для a_{ii} суммирование по индексу j означает, что сумма $\sum_{j=1}^N \sum_{m,n} x_{m,n}^{[i]} x_{m,n}^{[i]}$ сформируется из данных i – ой полосы в местах ее пересечения со всеми другими полосами. Вторая сумма $\sum_{m,n} x_{m,n}^{[i]} x_{m,n}^{[i]}$ в этом выражении формируется из данных i – ой полосы в местах ее пересечения с данными уже выложенными на карту (если таковые имеются).

Решая систему уравнений (3) находим набор коэффициентов $k^{[i]}$ для коррекции данных батиметрии. Сама процедура коррекция заключается в замене отсчетов глубины $z_{m,n}^{[i]}$ на отсчеты $(z_{m,n}^{[i]} + k^{[i]} x_{m,n}^{[i]})$.

Поправка к углу крена $\Delta\beta^{[i]}$ (в радианах) для i – ой полосы батиметрических данных определяется по коэффициенту $k^{[i]}$ исходя из следующего соотношения:

$$\Delta\beta^{[i]} = \arctg(k^{[i]}) \quad (4)$$

Отметим, что предложенный способ коррекции батиметрии можно использовать для калибровки интерферометрического гидролокатора бокового обзора по углу крена. В этом случае поправка $\Delta\beta$, которую необходимо добавить к заданному значению угла наклона интерферометра β , находится как среднее значение от поправок, вычисляемых с помощью формулы (4). При этом, разумеется, все обрабатываемые файлы должны быть получены только калибруемой системой.

Очень часто в обрабатываемых данных присутствуют искажения батиметрии, как первого, так и второго типа одновременно. В этом случае для коррекции данных следует применять более общий алгоритм, обеспечивающий вычисление поправок, как углов крена $\Delta\beta$, так и глубины Δz . Алгоритм базируется на определении параметров $k^{[i]}$ и $\Delta z^{[i]}$, минимизирующих следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 & F(k^{[1]}, \dots, k^{[N]}, \Delta z^{[1]}, \dots, \Delta z^{[N]}) = \\
 & = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \sum_{m,n} \left[\left(z_{m,n}^{[i]} + \Delta z^{[i]} + k^{[i]} x_{m,n}^{[i]} \right) - \left(z_{m,n}^{[j]} + \Delta z^{[j]} + k^{[j]} x_{m,n}^{[j]} \right) \right]^2 + \\
 & \quad + \sum_{i=1}^N \sum_{m,n} \left[\left(z_{m,n}^{[i]} + \Delta z^{[i]} + k^{[i]} x_{m,n}^{[i]} \right) - \hat{z}_{m,n} \right]^2 \quad (5)
 \end{aligned}$$

при дополнительном условии:

$$\Delta z^{[1]} + \Delta z^{[2]} + \dots + \Delta z^{[N]} = 0 \quad (6)$$

Наличие дополнительного условия обязательно, так как без него задача минимизации функции может не иметь однозначного решения. Вычисление параметров $k^{[i]}$ и $\Delta z^{[i]}$, минимизирующих выражение (5) при дополнительном условии (6), может быть выполнено методом неопределенных множителей Лагранжа. Для этого составим функцию Лагранжа:

$$\begin{aligned}
 \bar{F}(k^{[1]}, \dots, k^{[N]}, \Delta z^{[1]}, \dots, \Delta z^{[N]}, \lambda) = & F(k^{[1]}, \dots, k^{[N]}, \Delta z^{[1]}, \dots, \Delta z^{[N]}) + \\
 & \lambda(\Delta z^{[1]} + \dots + \Delta z^{[N]}) \quad (7)
 \end{aligned}$$

Коэффициенты $k^{[i]}$, $\Delta z^{[i]}$ и λ , минимизирующие эту функцию, находим путем решения системы $2N + 1$ линейных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{F}(k^{[1]}, \dots, k^{[N]}, \Delta z^{[1]}, \dots, \Delta z^{[N]}, \lambda)}{\partial k^{[i]}} &= 0 \\
 \frac{\partial \bar{F}(k^{[1]}, \dots, k^{[N]}, \Delta z^{[1]}, \dots, \Delta z^{[N]}, \lambda)}{\partial \Delta z^{[i]}} &= 0 \quad (8) \\
 \frac{\partial \bar{F}(k^{[1]}, \dots, k^{[N]}, \Delta z^{[1]}, \dots, \Delta z^{[N]}, \lambda)}{\partial \lambda} &= 0
 \end{aligned}$$

где $i = 1, 2, \dots, N$

Решая эту систему уравнений относительно $k^{[i]}$, $\Delta z^{[i]}$ и λ , находим набор коэффициентов $k^{[i]}$ и $\Delta z^{[i]}$ для коррекции данных батиметрии перед их выкладкой на карту. Коррекция измерений глубины при этом заключается в преобразовании отсчетов глубины $z_{m,n}^{[i]}$ в отсчеты $(z_{m,n}^{[i]} + \Delta z^{[i]} + k^{[i]}x_{m,n}^{[i]})$.

Отметим, что предложенный способ коррекции требует, чтобы набор выкладываемых на карту полос батиметрии был связанным, то есть все полосы где-либо пересекались между собой и с данными уже выложенными на карту.

3. Пример применения алгоритмов коррекции батиметрии

Рассмотренные в работе алгоритмы и программное обеспечение, разработанное на их основе, прошли проверку на большом объеме экспериментального материала и показали высокую эффективность при обработке данных площадной батиметрической съемки [6-8]. На Рис. 1 и Рис. 2 в качестве иллюстрации приведены фрагменты батиметрических карт одного и того же участка морского дна. Информация о рельефе отображена в виде цветовой шкалы глубин. Обе ЦМР синтезированы на сетке с шагом в 1 метр по данным 60 пересекающихся полос батиметрии, полученных интерферометрическим гидролокатором бокового обзора. Площадь участка около 1 км². На Рис. 1 изображение рельефа сформировано по исходным батиметрическим данным. На Рис. 2, нанесенная на карту батиметрия была предварительно подвергнута обработке с использованием алгоритма коррекции данных по углу крена. Как видно из этих рисунков, применение алгоритма коррекции позволило устранить основные искажения и существенно улучшить качество синтезируемой цифровой карты, сохранив при этом все мелкие детали рельефа.

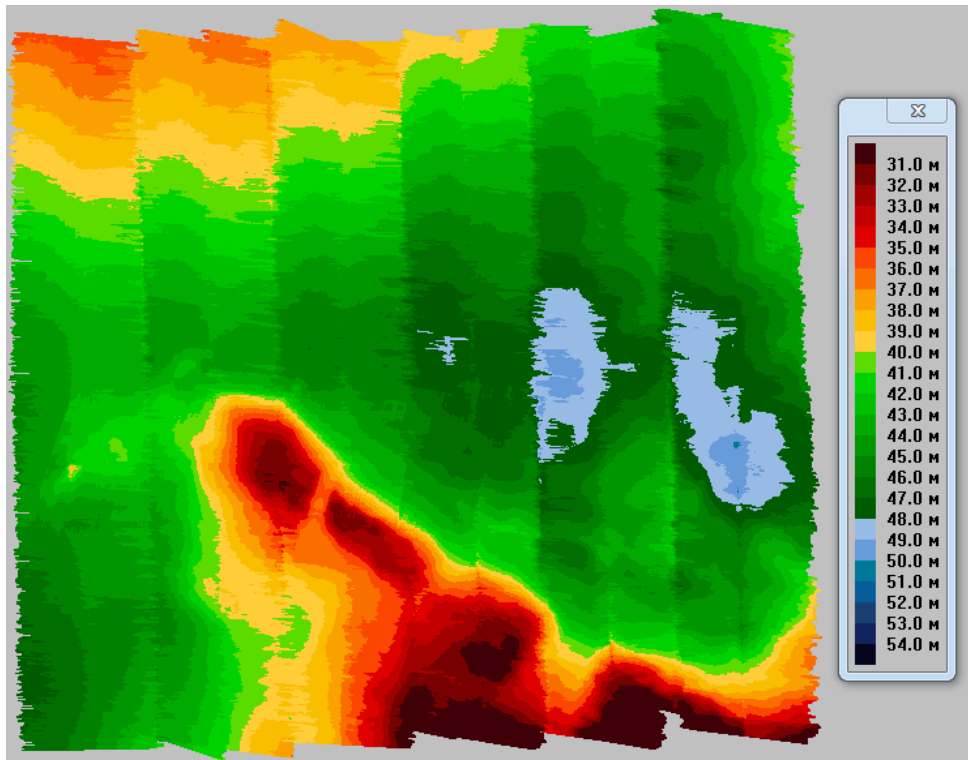


Рис. 1. Исходные батиметрические данные, нанесенные на карту без коррекции.

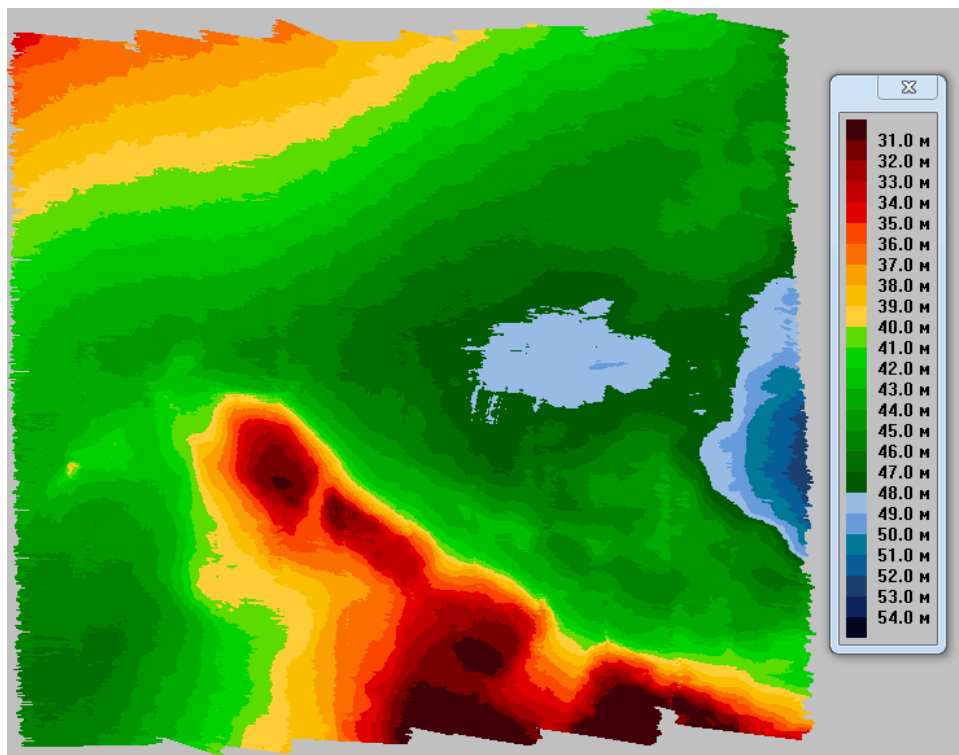


Рис. 2. Батиметрические данные, нанесенные на карту после их предварительной коррекции.

4. Заключение

В результате проведенных исследований разработаны и протестированы на архивных материалах алгоритмы коррекции данных батиметрии, используемые при формировании цифровых карт рельефа донной поверхности по данным полосовой съемки ИГБО. Экспериментальная проверка предложенных алгоритмов подтвердила возможность их применения для улучшения обработки данных площадной батиметрической съемки интерферометрических гидролокаторов бокового обзора. Разработанное на их основе программное обеспечение может быть интегрировано в геоинформационные системы в качестве программного продукта для построения карт глубин.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-07-00612.

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 // УФН, 2009, т. 179, № 2, с. 218-224.
4. Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа. Томск: Издательство «ТМЛ-Пресс», 2007. 178 с.
5. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. М. : Научный мир, 2003. 104 с.
6. Каевицер В.И., Римский-Корсаков Н.А., Смольянинов И.В., Разманов В.М., Кривцов А.П. Возможные проявления подводных грязевых вулканов по

результатам гидролокационных исследований в акватории Таманского полуострова // Океанология, 2016, т. 56, № 5, с. 784-790.

7. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Денисов Е.Ю. Разработка и результаты испытаний гидроакустического комплекса для исследования дна шельфовой зоны Арктических морей // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov16/1/text.pdf>
8. 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>

Для цитирования:

В. И. Каевицер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов, А. В. Элбакидзе. Алгоритмы коррекции данных батиметрии при формировании цифровой карты рельефа донной поверхности на регулярной сетке. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may18/9/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.5.9