

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.12>

УДК: 551.463.621.391

КАЛИБРОВКА ПАРАМЕТРОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ НА УЧАСТКЕ МОРСКОГО ДНА С ИЗВЕСТНЫМ РЕЛЬЕФОМ

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

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, Фрязино, пр. Введенского, д. 1

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2022 г.

Аннотация. В работе рассмотрены алгоритмы вычисления параметров интерферометрического гидролокатора бокового обзора (ИГБО) на основе обработки данных акустической съемки поверхности морского дна с известным рельефом. Проведено опробование алгоритмов на математических моделях сигналов, отраженных от плоской горизонтальной поверхности. Возможности предлагаемых алгоритмов продемонстрированы на экспериментальных фазоразностных измерениях ИГБО полученных на участке с ровным морским дном. Показана эффективность алгоритмов для калибровки интерферометрических гидролокаторов бокового обзора.

Ключевые слова: интерферометрический гидролокатор бокового обзора, фазоразностные измерения, рельеф поверхности морского дна, алгоритм калибровки ИГБО, математическое моделирование, экспериментальная проверка эффективности калибровочных измерений.

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

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

Введение

Интенсивное освоение Мирового океана, прибрежных и шельфовых зон морей, а также внутренних акваторий, привело к появлению и развитию различных видов гидроакустических комплексов для изучения и картографирования донной поверхности. К числу таких систем относятся и ИГБО, позволяющие одновременно получать высококачественные акустические изображения и измерять рельеф морского дна в широкой полосе обзора [1-5]. Получаемые ИГБО исходные данные, как правило, содержат различного рода искажения, влияющие на точность синтезируемых с помощью ЭВМ цифровых батиметрических карт. Для компенсации искажений, вызванных внешними факторами разработаны алгоритмы их коррекции при камеральной обработке [6,7], использующие показания датчиков системы навигации и опорные глубины, полученные узко лучевым эхолотом. К числу технических характеристик (аппаратурных параметров), оказывающих наибольшее влияние на качество измерений, относятся погрешности в определении базы интерферометра, угла крена антенн, а также фазовые набег в каналах приемной аппаратуры. Калибровочные измерения позволяют оценить имеющиеся погрешности и учесть их при дальнейшей обработке данных. В данной работе рассмотрен способ калибровки ИГБО, позволяющий уточнить базу и угол крена антенн гидролокационного комплекса и компенсировать искажения, вызванные неточностью знания этих параметров. Метод основан на обработке данных специальных калибровочных сеансов съемки на участке морского дна с рельефом, не имеющем регулярного уклона и применяется после каждой установки антенн гидролокационного комплекса в рабочее положение на судне носителе ИГБО.

1. Принцип измерения рельефа двух-антенным интерферометром

Интерферометрический метод измерения рельефа морского дна рассмотрим на примере обработки сигналов простого интерферометра, образованного парой приемных антенн A_1 и A_2 , находящихся на расстоянии d друг от друга. Положение интерферометра во время съемки показано на рисунке 1. Введенная здесь приборная система координат (ПСК) имеет следующую ориентацию координатных осей:

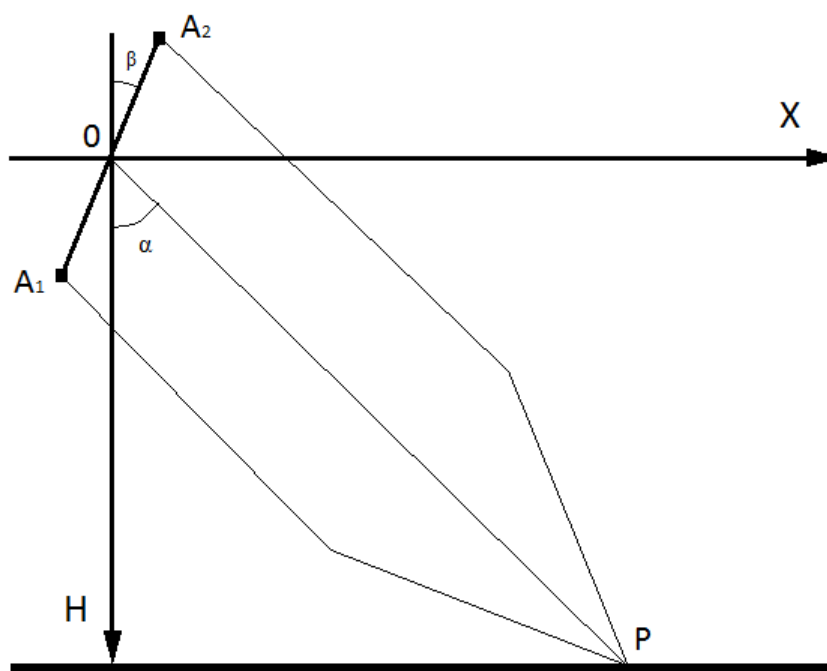


Рис. 1. Геометрия обзора донной поверхности интерферометрическим гидролокатором бокового обзора

- ось X направлена перпендикулярно направлению движения носителя ИГБО
- ось Y направлена по курсу движения носителя ИГБО
- ось H направлена вертикально вниз

В процессе локации импульсный сигнал, излученный передающей антенной, отражается от донной поверхности и принимается на две разнесенные в пространстве антенны A_1 и A_2 . Угол отклонения плоскости базы от вертикали равен β , а угол визирования объекта на поверхности морского дна α . Выражение

для интерферометрической разности фаз сигналов, регистрируемых в приемных каналах антенн A_1 и A_2 в зависимости от времени, определяется соотношением:

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

где:
$$\alpha(t) = \arccos\left(\frac{2H}{ct}\right). \quad (2)$$

Здесь H – глубина в точке отражения сигнала, c – скорость звука, t – время прихода эхо-сигнала, d – база интерферометра, λ – длина волны акустического сигнала, φ_0 – аппаратурная разность фаз сигналов в приемных каналах интерферометра.

Выражение (1) описывает развернутую интерферометрическую фазу, монотонно меняющуюся в зависимости от времени в диапазоне:

$$\frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\beta) + \varphi_0 \geq \varphi(t) > -\frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\beta) + \varphi_0. \quad (3)$$

Наличие таких фазовых измерений позволяет с помощью соотношений (1) и (2) провести расчет глубины $H(t)$ во всем диапазоне углов обзора $\alpha(t)$. Однако, получаемые в процессе локации отсчеты фазы $\Delta\varphi(t)$, находятся в интервале $[-\pi, \pi)$ и для вычисления рельефа необходимо предварительно устранить 2π -неоднозначность фазовой компоненты. Устранение 2π -неоднозначности (“разворот” интерферометрической фазы) – наиболее сложный этап обработки данных. Тем не менее, существует целый ряд алгоритмов, позволяющих выполнить такой разворот с достаточной для практических целей точностью [8].

2. Калибровка параметров ИГБО

Как видно из (1) и (2), фазовые измерения зависят от таких параметров интерферометра как: $D = d/\lambda$, β и φ_0 . Для обеспечения качественных расчетов батиметрии эти величины должны быть известны с высокой точностью. Если аппаратурную разность фаз φ_0 можно измерить в лабораторных условиях на этапе предварительной подготовки, то остальные два параметра должны уточняться на месте проведения работ после каждой установки антенн гидролокационного комплекса в рабочее положение. Предлагаемый ниже способ

определения угла наклона β и измеряемой в длинах волн базы интерферометра $D = d/\lambda$ базируется на обработке данных площадной съемки плоского участка морского дна с рельефом не имеющем регулярного уклона. Суть метода состоит в вычислении параметров D и β , минимизирующих следующее выражение:

$$F(D, \beta) = \sum_{i=0}^N \{\varphi_i - [2\pi D \cos(\alpha_i + \beta) + \varphi_0]\}^2, \quad (4)$$

где:
$$\alpha_i = \arccos(2H/ct_i). \quad (5)$$

Здесь φ_i – экспериментально измеренные отсчеты развернутой интерферометрической фазы на моменты времени t_i , N – число таких отсчетов. H – глубина участка, на котором выполняются калибровочные измерения. Минимум функции $F(D, \beta)$ находим из решения системы уравнений:

$$\frac{\partial F(D, \beta)}{\partial D} = 0; \quad \frac{\partial F(D, \beta)}{\partial \beta} = 0. \quad (6)$$

После выполнения всех вычислительных процедур уравнения (6) сводятся к виду:

$$\begin{cases} D = \frac{\sum_{i=0}^N \varphi_i \sin(\alpha_i + \beta)}{\pi \sum_{i=0}^N \sin(2(\alpha_i + \beta)) + 2\pi \sum_{i=0}^N \varphi_0 \sin(\alpha_i + \beta)} \\ D = \frac{\sum_{i=0}^N \varphi_i \cos(\alpha_i + \beta) - \sum_{i=0}^N \varphi_0 \cos(\alpha_i + \beta)}{2\pi \sum_{i=0}^N \cos^2(\alpha_i + \beta)} \end{cases}. \quad (7)$$

На рисунке 2 представлены графики зависимости D от β для этих двух уравнений. При моделировании расчет фазовых данных велся для глубины $H = 100$ метров и углов обзора в диапазоне $0^\circ \leq \alpha(t) \leq 65^\circ$. Параметр D был взят равным 10, $\beta = 30^\circ$, а $\varphi_0 = 0^\circ$. Точка пересечения графиков, являющаяся искомым значением параметров D и β , как раз соответствует этим величинам.

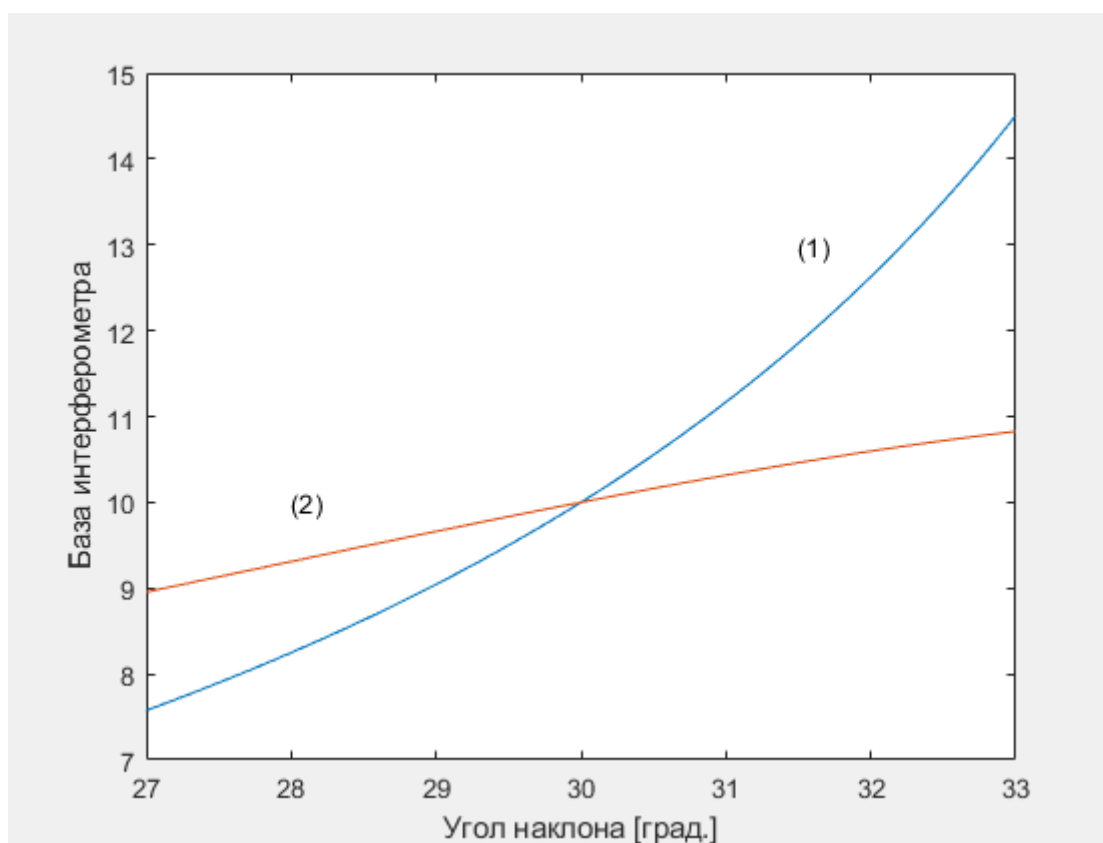


Рис. 2. Зависимость $D(\beta)$ для системы уравнений (7)

Применение описанного метода требует предварительной подготовки экспериментальных данных по устранению 2π неоднозначности фазовой компоненты. Для калибровочных измерений, проводимых на ровных участках морского дна, эта процедура обычно не вызывает больших затруднений. Тем не менее, небольшая модификация описанного выше алгоритма позволяет избежать дополнительных вычислений по развороту фазы. В модифицированном алгоритме вместо отсчетов развернутой фазы φ_i предлагается использовать отсчеты функции $\cos(\Delta\varphi_i)$, где $\Delta\varphi_i$ измеренное значение интерферометрической фазы на момент времени t_i , находящееся в интервале $[-\pi, \pi)$. Таким образом, вместо (4) требуется определять параметры D и β минимизирующие выражение:

$$F_1(D, \beta) = \sum_{i=0}^N \{\cos(\Delta\varphi_i) - \cos[2\pi D \cos(\alpha_i + \beta) + \varphi_0]\}^2. \quad (8)$$

В отличие от (1), функция $\cos(\varphi(t))$ не является монотонной и в полосе обзора имеет целый ряд локальных максимумов и минимумов, число которых зависит от базы интерферометра. Если рассматривать эту функцию как сигнал,

зависящий от D и β как от параметров, то двумерная автокорреляционная функция такого сигнала имеет вид, показанный на рисунке 3.

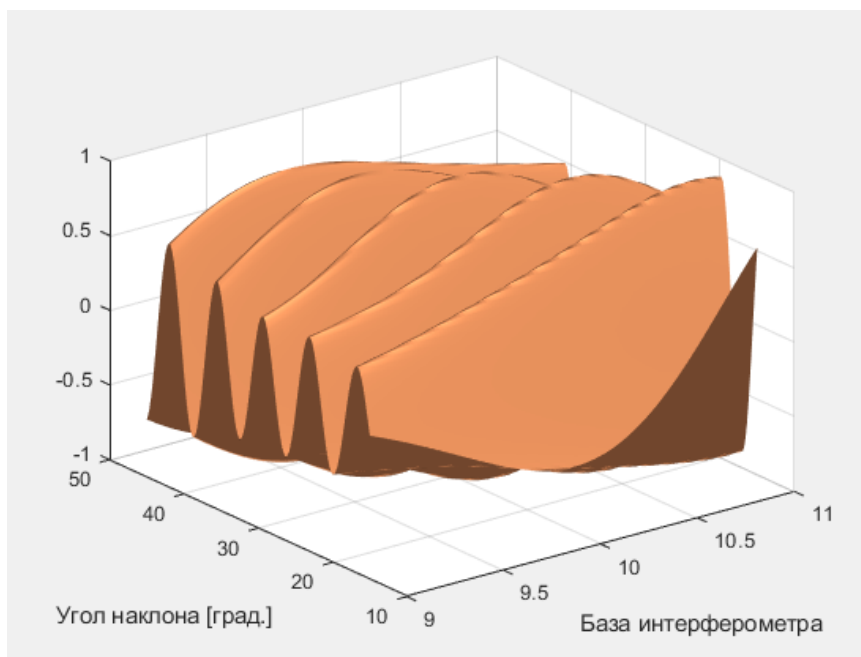


Рис. 3. Двумерная нормированная автокорреляционная функция сигнала $\cos(\varphi(t))$ в зависимости от параметров D и β

Расчеты выполнены для базы интерферометра $D = 10$ и угла наклона $\beta = 30^\circ$. При моделировании фазовых данных, как и ранее, глубина H равнялась 100 метрам, а угол обзора был в диапазоне $0^\circ \leq \alpha(t) \leq 65^\circ$.

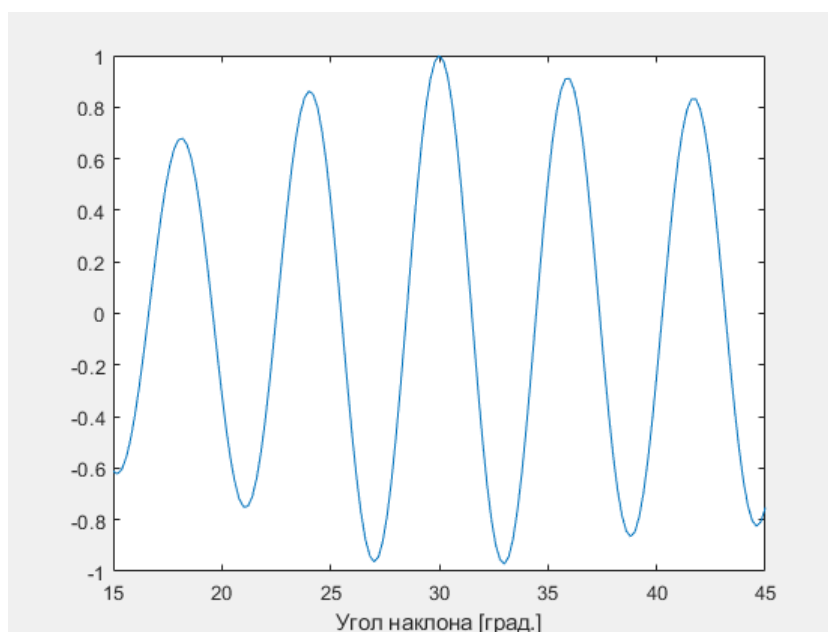


Рис. 4. Сечение плоскостью $D = 10$ тела неопределенности автокорреляционной функции сигнала $\cos(\varphi(t))$

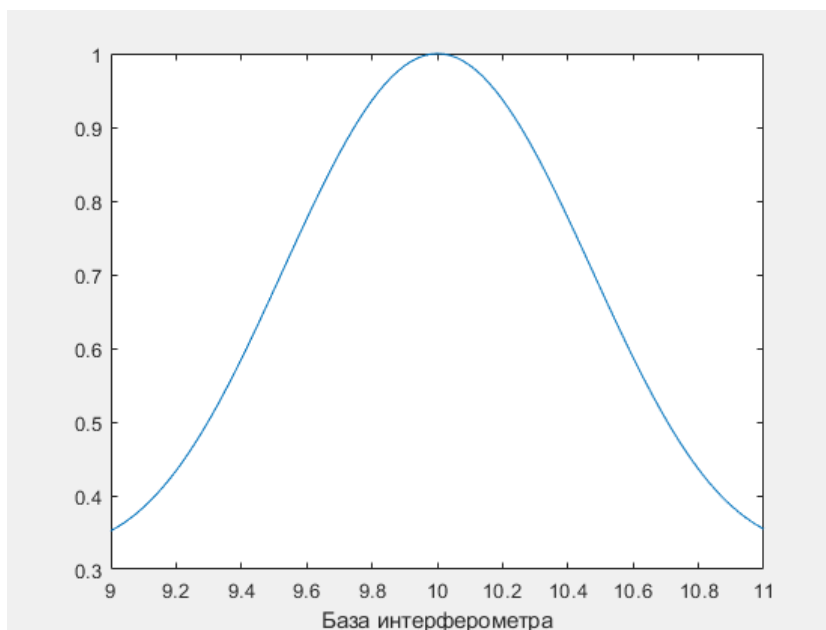


Рис. 5. Сечение плоскостью $\beta = 30^\circ$ тела неопределенности автокорреляционной функции сигнала $\cos(\varphi(t))$

На рисунках 4 и 5 показаны сечения тела неопределенности этой функции плоскостями $D = 10$ и $\beta = 30^\circ$. Как видно из рисунка 4, в сечении плоскостью $D = 10$ автокорреляционная функция имеет несколько локальных максимумов сопоставимых по величине с основным. Таким образом, при определении численными методами параметров D и β , минимизирующих значение функции (8), требуется достаточно точное начальное приближение ошибки по углу β , которая должна быть не более $\pm\Delta\beta = 1/2D$.

3. Экспериментальная проверка алгоритма калибровки

Экспериментальная проверка предложенных алгоритмов проводилась на данных полученных ИГБО в ходе зондирования ровной донной поверхности с рельефом, не имеющем видимых деталей. В процессе съемки для каждой из антенн интерферометра регистрировались квадратурные компоненты принимаемого сигнала. В дальнейшем, на их основе, были построены акустическое изображение дна и интерферометрическая разность фаз для двух-антенного интерферометра.

На рисунке 6(a) приведен фрагмент полученного акустического изображения в полутонном отображении скопированный с экрана монитора

ИГБО. На рисунке 6(б) показана фазограмма $\cos(\varphi(t))$ этого же участка на которой, также в полутонном отображении, показаны вариации функции $\cos(\varphi(t))$ в зависимости от времени прихода сигнала. Изображения сформированы при движении судна-носителя ИГБО сверху вниз по вертикали с левого края кадра. Каждая строка данных на этих картинках соответствует одному циклу излучения и приема сигнала.

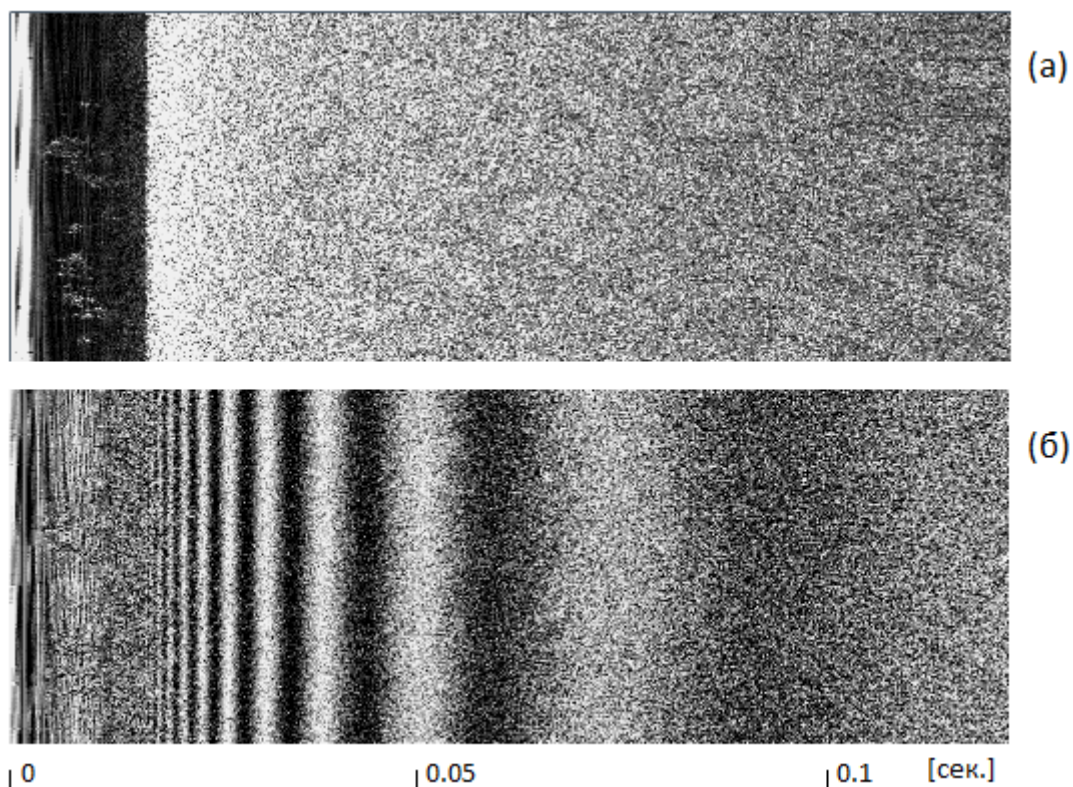


Рис. 6. Акустическое изображение (а) и фазограмма (б) ровного участка морского дна на экране монитора ИГБО

В процессе обработки применялась процедура сглаживания фазовых измерений, которая заключалась в усреднении фазовых данных полученных за 100 циклов излучения и приема зондирующего сигнала. На рисунке 7 показана зависимость $\cos(\varphi(t))$ от времени, полученная после такого усреднения фазовых измерений на выбранном для калибровки участке дна.

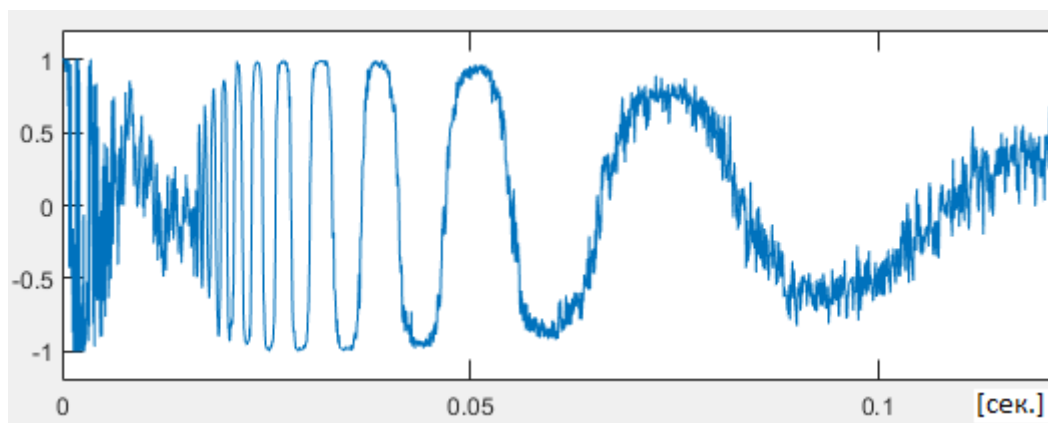


Рис. 7. Вариации функции $\cos(\varphi(t))$ в зависимости от времени прихода сигнала t , усредненные по 100 циклам излучения и приема сигнала ИГБО

В дальнейшем эти усредненные данные использовались для вычисления базы и угла наклона интерферометрического гидролокатора бокового обзора. Расчет велся с применением второго из описанных выше алгоритмов. Поиск минимума функции (8) был выполнен численными методами на прямоугольной сетке параметров D и β в диапазонах $9 \leq D \leq 11$ для базы и $27^\circ \leq \beta \leq 33^\circ$ для угла наклона. В результате обработки получены значения: $D = 9.34$ и $\beta = 31.6^\circ$. Далее эти уточненные значения параметров D и β применялись для вычисления рельефа донной поверхности на тестируемом участке.

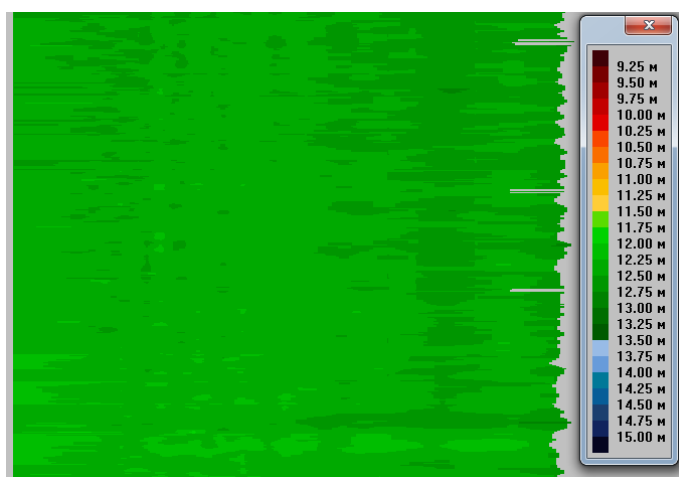


Рис. 8. Изображение рельефа участка морского дна на глубине около 12 метров на экране монитора

На рисунке 8 в цветовой палитре показано изображение рельефа этого участка, полученное после обработки данных. Это ровный участок морского дна, без каких-либо деталей на глубине около 12 метров. Сопоставление полученной батиметрии с данными эхолота подтвердило их хорошее соответствие.

В условиях реальной гидролокационной съемки не всегда имеется возможность найти ровный горизонтальный участок дна для калибровочных измерений. Более детальная проверка предложенных алгоритмов показала возможность их применения и для калибровочных измерений в морских районах со слаборасчлененными формами рельефа. Однако, при среднем наклоне донной поверхности по крену превышающем $\pm\Delta\beta = 1/2D$, возникает погрешность в определении угла наклона интерферометра β . Для определения этой погрешности калибровку следует проводить на пересекающихся галсах, что дает возможность вычислить ошибку и учесть ее влияние при дальнейшей обработке.

Заключение

Предложен способ калибровки и разработаны алгоритмы вычисления параметров установки акустических антенн интерферометрического гидролокатора бокового обзора по данным съемки донной поверхности на участке с известным рельефом. Проведено опробование алгоритмов на математических моделях и реальных сигналах, полученных при гидроакустическом обследовании дна, подтвердившие их эффективность для решения поставленной задачи. Показана возможность применения разработанных алгоритмов для калибровки параметров ИГБО.

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., Скнаря А.В., Тошов С.А. К вопросу о применении алгоритмов построения рельефа дна в интерферометрическом гидролокаторе бокового обзора «НЕМАН ИГБО-500». *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2017. №2.
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.
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.
7. Сосновский А.В. Оценивание точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке данных радиолокаторов с синтезированной апертурой. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.9>

8. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Сравнение некоторых современных методов разворота разности фаз в радиолокационной интерферометрии. *Радиотехника и электроника*. 2003. Т.48. №10. С.1208-1213.

Для цитирования:

Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Калибровка интерферометрического гидролокатора бокового обзора по данным съемки на участке дна с известным рельефом. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.12>