

УДК 581.783.24 (31)

В.И.Короченцев, Е.М.Титов, А.Н.Розенбаум, А.П.Белаиш

Короченцев Владимир Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой гидроакустики и ультразвуковой техники ДВГТУ. E-mail: Koroch@mail.ru

Титов Евгений Максимович – ст.преподаватель кафедры гидроакустики ДВГТУ.

Розенбаум Анатолий Наумович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем управления ДВГТУ.

Белаиш Алексей Павлович – доц. кафедры судовождения Камчатского ТГУ.

НАВИГАЦИЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПО КАРТАМ МОРСКОГО ДНА

Предлагается несколько подходов к решению проблем повышения вероятности правильного выбора траектории подводного аппарата при изменении внешней конфигурации рельефа дна. В последние годы наряду с традиционными способами навигации подводных объектов стали развиваться картографические методы. В память компьютера, управляющего движением аппарата, вводится карта рельефа местности, по которой строится траектория перемещения летательного (или подводного) объекта.

Ключевые слова: навигация, акустика, карта.

Vladimir I. Korochentsev, Evgeny M. Titov, Anatoly N. Rozenbaum, Alexei P. Belash **NAVIGATION OF UNDERWATER VEHICLES WITH THE HELP OF SEA BOTTOM MAPS IN CASE OF SEAQUAKE OR OTHER CATASTROPHIC PHENOMENA**

The article suggests a number of approaches to solving problems of proper routing for an underwater vehicle in case of a sea bottom configuration changes. In the last few years cartographic techniques are being developed alongside with traditional aids of navigation. Data on surface geometry are input in a computer that controls the motion of aircraft or underwater vehicles. But earth-

quakes, seismic sea, or industrial detonations result in a dramatic change both in ground surface and sea bottom.

Key words: navigation, acoustics, earthquake.

Построим математический алгоритм навигации подводных аппаратов при нарушении структуры грунта. Отметим, что после катастрофических явлений можно проводить навигацию по магнитным и электрическим полям. Выведем математические модели.

Один подход основан на построении карты коэффициентов отражения дна и учета слоистости подводного грунта. Второй подход – на выявлении новых предвестников: упругих волн, электромагнитных полей, гравитационных волн.

Для повышения эффективности экологического мониторинга водных районов измерительные датчики можно помещать на подводных аппаратах. При этом навигационное обеспечение подводных работ имеет решающее значение для успешного выполнения миссии точного измерения параметров водной толщи и морского дна. Особое значение подводные аппараты приобретают при измерении физических полей для прогноза катастрофических подводных событий природного и техногенного характера: землетрясений, цунами, тайфунов. Во время и после катастрофических событий использование необитаемых подводных аппаратов также является эффективным средством мониторинга.

Рассмотрим проблемы навигации подводных объектов, перемещающихся вблизи границ раздела моря с морским дном и атмосферой. Основным требованием к подводным объектам, рассматриваемым в статье, является их малогабаритность с высокой информативностью канала передачи сигналов связи и управления. Такими объектами могут быть автоматизированные подводные аппараты, автономные измерительные датчики физических полей, радиогидроакустические буи, антенны [3].

Проблемы управления такими объектами рассмотрены в многочисленных публикациях. При этом наиболее полно проблемы акустической навигации и

связи подводных аппаратов освещены в монографии [1]. Описанные системы навигации подводных аппаратов с длинной, короткой и ультракороткой базой позволяют успешно решать задачи поиска затонувших объектов и проводить различные научно-исследовательские работы.

Следует отметить способы навигации по акустическим картам рельефа дна моря. Известные методы навигации не позволяют разместить большие объемы информации о микрорельефе дна в ограниченном объеме малогабаритных подводных объектов, поэтому необходимо разрабатывать новые методы ориентации подводных объектов в пространстве, позволяющие разместить максимальное количество навигационной информации в ограниченном объеме электронных блоков.

Построение навигационных карт предполагает измерение аномалий физических полей различной природы в «привязке» к географическим координатам. Аномалии полей могут быть измерены различными датчиками: акустическими, магнитными, гравитационными, электрическими. В соответствии с измеренными аномалиями можно построить соответственно карты акустических, магнитных, гравитационных, электрических аномалий.

В одних районах океана наиболее информативны карты рельефа дна, в других – магнитные поля, в третьих – электрические поля и т.п. Выбор оптимальных, с точки зрения скорости обработки навигационной информации, физических полей является большим резервом для построения новых малогабаритных подводных аппаратов и систем.

Для построения цифровых карт аномалий геофизических полей необходимо выполнить несколько процедур физических измерений в реальных морских условиях. Результаты измерений содержат избыточную информацию, которую не обязательно использовать для построения цифровых карт аномалий. После фильтрации результатов измерений и выделения необходимых для навигации признаков объем информации в цифровой карте, по сравнению с первичными наблюдениями, может быть уменьшен на несколько порядков. Именно этот уменьшенный объем информации вводится в блок навигации малогаба-

ритного подводного аппарата или объекта. Предлагаемый подход позволяет значительно увеличить площадь подводного навигационного района, размещенного в заданном ограниченном объеме памяти навигационного блока подводного объекта.

Проблемы построения карт рельефа в оптическом диапазоне известны и получили достаточное освещение в научной литературе.

Особого внимания требуют принципиальные сложности построения карт с помощью акустических волн. У большинства навигационных систем управление и связь под водой проектируются с использованием упругих волн.

Главная особенность построения карт по акустическим неоднородностям по сравнению с оптическим диапазоном заключается в сферичности волн, излучаемых и принимаемых гидроакустическими датчиками. Электромагнитные волны оптического диапазона значительно меньше размера микрорельефа отражающей поверхности, поэтому модель коэффициентов отражения (соответственно, и построения карт), которая не изменяется от дистанции между подводным объектом и дном (поверхностью земли) может быть построена для плоских волн. Другими словами, карта рельефа дна (поверхности земли), будет одинакова для различных высот объекта навигации над поверхностью раздела сред.

Длина акустических волн, используемых при построении карт, может находиться в диапазоне от десятков сантиметров до единиц метров. Она соизмерима с высотой нахождения подводного объекта над грунтом (от единиц до сотен метров). Очевидно, здесь сферичностью волн нельзя пренебрегать. Одна карта, снятая для одной высоты объекта, будет выглядеть по-другому на различных высотах. Построение карт на малых длинах волн (от 1 мм до 1 см) позволяет использовать модель плоских волн с высотой объекта над дном не более нескольких десятков метров, что существенно снижает эффективность и производительность работы подводных аппаратов и систем.

Кроме проблем сферичности на малых высотах над грунтом проявляются слабо изученные аномальные эффекты отражения и преломления волн от дна

океана. Такие эффекты проявляются на углах отражения, превышающих критический угол. При этом грунтом поглощается более 30% акустической энергии волн, что значительно превышает значение, указанное в классической теории.

Построение карт коэффициента отражения сферических волн от поверхности раздела двух сред предложено проводить по следующему алгоритму.

В память навигационного блока можно ввести не результаты вычисленного коэффициента отражения волн, а некоторый математический эквивалент этого измерения. Указанный показатель представляет собой некоторую «квази-карту» коэффициента отражения, которая не зависит от высоты аппарата над грунтом.

Поставим задачу оценивания. Пусть движение автономного подводного аппарата (АПА) описывается системой дифференциальных уравнений

$$\dot{z} = A(t)z(t) + e(t); \quad z(0) = e(0), \quad (1)$$

где z – вектор состояния системы размерности N ;

$e(t)$ – неизвестный вектор возмущений;

$A(t)$ – известная матрица размерности $N \times N$.

Наряду с моделью (1) имеется вектор $y(t)$, характеризующий зависимость измерений от вектора состояния системы. Пусть измерения линейно зависят от вектора состояния

$$y = H(t)z(t) + s(t), \quad (2)$$

где y – вектор измерений размерности M ;

$H(t)$ – матрица размерности $M \times N$;

вектор $s(t)$ представляет собой ошибки измерений.

Поставим задачу поиска оптимальной в некотором смысле оценки вектора z по данным измерений y . При этом конкретный смысл критерия оптимальности получаемой оценки, а также точная формализация характеристик возмущений $y(t)$ и ошибок измерений $s(t)$ определяют способ построения алгоритма оценивания. Классическим подходом является гипотеза о случайном характере ошибок измерений и возмущений с нормальной плотностью распределения и

задания среднеквадратического критерия качества. При этом для систем вида (1), (2) удастся получить в явном виде решение задачи оценивания вектора состояния системы. Однако в общем случае не удастся гарантировать выполнение требуемых условий, в частности, возмущения в модели (1) могут иметь случайную природу, а вероятностные характеристики ошибок измерений могут быть известны не полностью. Иным способом получения оценок является гарантирующий (минимаксный) подход, сущность которого состоит в интерпретации всех неконтролируемых факторов, включая и случайные, для которых характеристики (моменты) точно не известны, как неопределенных факторов, в которых известными являются лишь диапазоны их изменения или, более точно, некоторые предельные (доверительные) множества. При этом оптимальная стратегия оценивания определяется как гарантирующая достижение наилучшего результата при наихудшем сочетании неопределенных факторов. Если при этом доверительное множество неопределенных факторов выбрать априори так, что его вероятностная мера будет не ниже заданной, то минимаксная стратегия управления будет гарантировать достижение результата с такой же вероятностью.

Для построения системы навигации целесообразно использовать структурную схему следующего вида (рис. 1). Основу системы составляет блок базовой навигационной системы (БНС), в качестве которой могут быть использованы инерциальная или доплеровская навигационная системы. Результатом работы базовой навигационной системы являются оценки текущего местоположения подводного аппарата, величин скорости, угла курса и других параметров с некоторыми погрешностями, определяющими область неопределенности параметров.

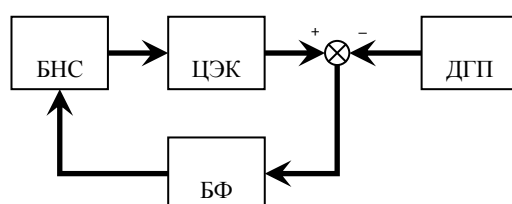


Рис. 1. Структурная схема системы навигации по геофизическим полям

В заданной области коррекции текущие оценки местоположения используются для получения прогноза о величине измеряемого параметра геофизического поля по цифровой эталонной карте (ЦЭК). Действительные показания датчика геофизического поля (ДГП) сравниваются с этим прогнозом, и их разность обрабатывается блоком фильтрации (БФ) для формирования вектора ошибок БНС. Через контур обратной связи производится компенсация ошибок БНС. Данный процесс повторяется при движении аппарата по траектории, обеспечивая непрерывную корректировку. В блоке фильтрации используется минимаксный фильтр калмановского типа или эллипсоидальный фильтр, вычисляющий гарантированную оценку параметров движения подводного аппарата.

Как мы уже отмечали выше, можно построить не карту рельефа дна, а псевдокарту – набор значений, сопоставленный с некоторой областью дна океана. В качестве такой информации предлагается использовать толщину слоев дна и коэффициент отражения от границы вода-грунт.

При излучении звукового импульса прямоугольной формы с синусоидальным заполнением первый отраженный импульс будет нести информацию о расстоянии до дна и коэффициент отражения границы вода-дно, последующие импульсы – информацию о толщине слоев. Данные величины характеризуют свойства данного участка дна.

Карта коэффициентов отражения будет иметь меньшую зависимость внешнего вида карты от сферического расхождения волн в среде, если рассчитывать коэффициенты отражения, используя следующую модель [2].

Уравнение Гельмгольца (3) с граничными условиями (4):

$$\Delta \varphi + k_m^2(\bar{r})\varphi = q \delta_0; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_m \varphi_m|_{s_m} &= \rho_{m+1} \varphi_{m+1}|_{s_m}, \\ \frac{\partial \varphi_m}{\partial n}|_{s_m} &= \frac{\partial \varphi_{m+1}}{\partial n}|_{s_m}, \end{aligned} \quad (4)$$

где φ – потенциал колебательной скорости;

m – номер слоя;

ρ_m – плотность m -го слоя;

c_m – фазовая скорость m -го слоя;

$k_m = \frac{\omega}{c_m}$ – волновое число для m -го слоя;

ω – циклическая частота;

$q(\vec{r}_0)$ – плотность распределения источников;

$\vec{n}$ – нормаль к границе раздела между слоями S ;

$\vec{r}$ – радиус-вектор, указывающий на точку наблюдения;

$\vec{r}_0$ – радиус-вектор, указывающий на точку расположения источника.

Решение уравнения (3) с граничными условиями (4) в случае излучения звука точечным источником в присутствии только двух различных сред можно записать для верхней среды в виде [2]:

$$P_1(\vec{r}) = P_0 \left[\frac{e^{ik_m R}}{R} + K_{omp} \frac{e^{-ik_m R}}{R} \right], \quad (5)$$

где $P(\vec{r})$, P_0 – давление отраженной и излученной волны;

R – расстояние между источником и точкой наблюдения;

$K_{отр}$ – функция, зависящая только от угловых координат (имеет смысл коэффициента отражения волн от границы раздела).

Теоретическое выражение для коэффициента отражения, исходя из параметров сред, определяется как:

$$K_{отр} = \frac{\left(\rho_1 c_1 \frac{\partial R_{np}}{\partial n} h_0^{(1)}(k_1 R_0|_{S_{ГР}}) \cdot h_1^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{ГР}}) - \right.}{\left. - \rho_2 c_2 \frac{\partial R}{\partial n} h_1^{(1)}(k_1 R_0|_{S_{ГР}}) \cdot h_0^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{ГР}}) \right)} , \quad (6)$$

$$\left(\rho_1 c_1 \frac{\partial R_{np}}{\partial n} h_0^{(2)}(k_1 R_0|_{S_{ГР}}) \cdot h_1^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{ГР}}) + \right.$$

$$\left. + \rho_2 c_2 \frac{\partial R}{\partial n} h_1^{(2)}(k_1 R_0|_{S_{ГР}}) \cdot h_0^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{ГР}}) \right)$$

где $S_{ГР}$, $\vec{n}$ – граница раздела двух сред и нормаль к границе соответственно;

R_{np} – расстояние между мнимым источником прошедших во вторую среду волн и точкой приема (подробно расчет координат положения мнимого источника изложен в работе [2]).

Для второй среды выражение будет иметь вид:

$$P_2(\bar{r}) = P_0 \cdot K_{np} \frac{e^{ik_m R_{np}}}{R_{np}}, \quad (7)$$

где R_{np} – расстояние между неким мнимым источником прошедших волн и точкой наблюдения;

K_{np} – функция, зависящая только от угловых координат (имеет смысл коэффициента прохождения).

Выражения для $K_{отр}$, K_{np} , R_{np} , вследствие их громоздкости не приводятся здесь и приведены в работе [2].

В случае m слоев получим сложную структуру мнимых источников и выражения (5), (6), а также для $K_{отр}$, K_{np} , R_{np} будут иметь более громоздкий вид, однако вполне применимый для численных расчетов [2].

Исходя из (5) и известного измеренного значения давления принятой (отраженной от грунта) волны, можно определить значение коэффициента отражения для экспериментальных исследований:

$$K_{отр.изм} = \frac{P_{прин}}{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho_1 \cdot \left(h_0^{(1)}(k_1 \cdot 2 \cdot H) + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} h_0^{(1)}(k_1 \cdot \sqrt{4 \cdot H^2 + (n \cdot d)^2}) \right)}, \quad (8)$$

где $P_{прин}$ – принимаемое давление,

f – частота, на которой проводятся измерения,

H – расстояние между антенной и грунтом,

N – число элементов антенной решетки,

n – номер элемента излучающей антенной решетки,

d – расстояние между элементами антенной решетки.

На рис. 2 приведен график величины коэффициента отражения для сферических волн $K_{отр.расч.}$, рассчитанный по формуле (6) и $K_{отр.измер.}$, рассчитанный по формуле (8), в зависимости от высоты расположения антенны над грунтом (плотность грунта – 1580 кг/м³, скорость звука в грунте – 1578 м/с, частота – 200 кГц).

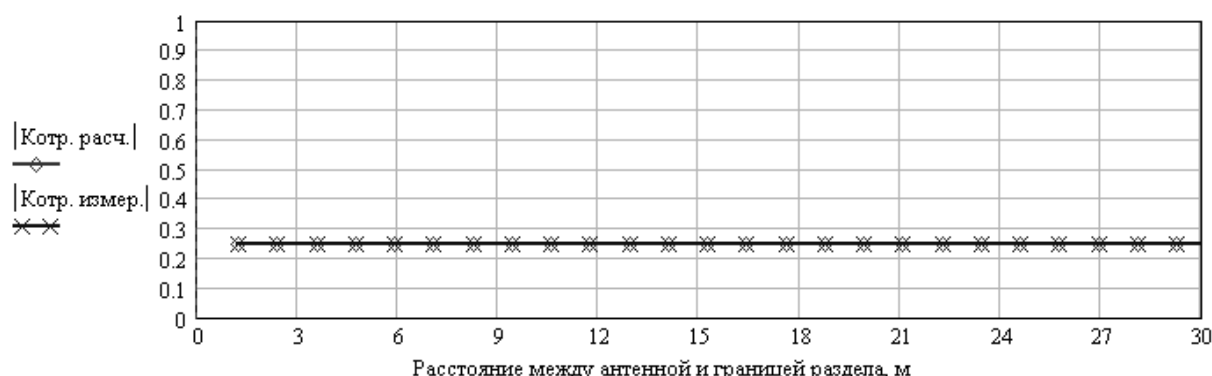


Рис. 2. Графики коэффициентов отражения $K_{отр. расч.}$ и $K_{отр. измер.}$.

На основе расчетов и сравнения графиков можно сделать вывод, что коэффициент отражения для сферических волн, рассчитанный по формуле (7) исходя из измеренного значения акустического давления волны, отраженной от дна, не зависит от высоты над дном и характеризует только акустические свойства того участка дна, где он был измерен. Таким образом, данный коэффициент можно использовать для составления навигационной карты коэффициентов отражения для сферических волн от дна.

Кроме того, регистрируя отражения от N слоев некоторой области дна, ей можно сопоставить значение коэффициента отражения и $N-1$ временных промежутков t_m , присущих только ей. Измеряя эти параметры для каждой области дна некоторого района, можно составить навигационную псевдокарту. При начальном картографировании нужно обойти район, для которого составляется карта, измеряя эти величины и привязывая их к географическим координатам участков дна.

Для реализации данного способа была собрана экспериментальная установка и создано программное обеспечение для нее. Установка состояла из эхолота «Humminbird» (рабочая частота 200 кГц, ширина главного максимума характеристики направленности 24° , длительность импульса 0,1 мс, частота повторения импульсов 0,25 с), 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя с усилителем и компьютера. Выход приемного тракта эхолота через усилитель подключен к аналого-цифровому преобразователю.

После излучения эхолотом акустического импульса программа считывает последовательность из 638 значений отраженного от донной структуры сигнала с аналого-цифрового преобразователя с заданным временным шагом, записывает ее в файл и отображает на экране в виде горизонтальной линии слева направо, цвет точки в линии соответствует значению напряжения на выходе приемного тракта эхолота. Т.к. отражение акустического сигнала происходит на границе сред с разными акустическими параметрами, то изменение цвета на экране будет соответствовать границе раздела слоев.

С помощью описанной выше установки были проведены измерения с борта неподвижного корабля в заливе Золотой Рог (рис. 3).

Измеренные значения представлены в виде графиков, показана часть, соответствующая отраженному от дна сигналу. По вертикали – время наблюдения в данной точке, по горизонтали – время после прихода импульса, отраженного от границы раздела вода-грунт, что позволяет наблюдать импульсы, отраженные от границ раздела слоев. Цвет точек соответствует напряжению на выходе приемного тракта эхолота.

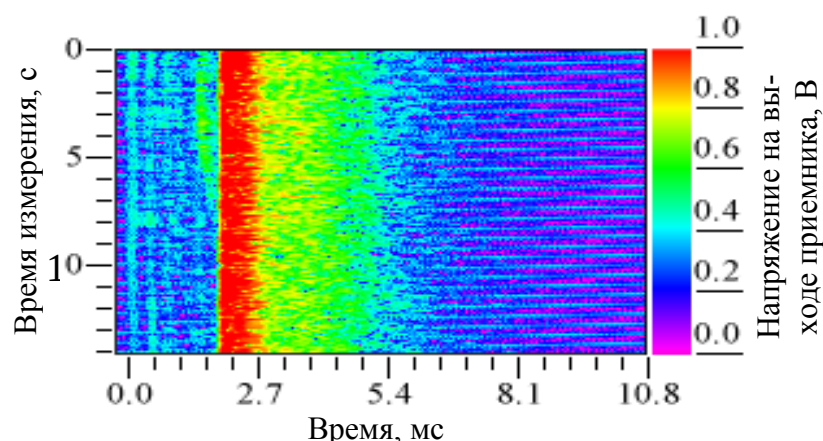


Рис. 3. Структура слоев дна при измерении с борта неподвижного корабля

Были проведены измерения с борта катера, двигавшегося в б. Патрокл. На рис. 4 показана структура слоистого дна, измеренная по ходу движения катера на протяжении 380 м.

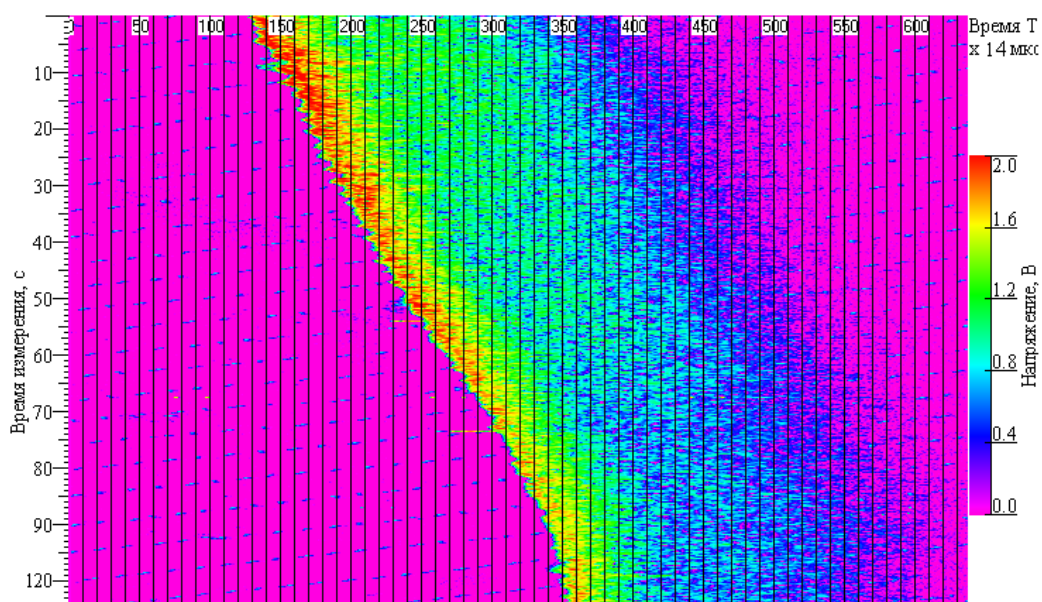


Рис. 4. Структура слоев дна вдоль движения катера

На рис. 5 приведен график изменения величины коэффициента отражения по давлению для сферических волн по ходу движения катера в б. Патрокл, рассчитанный по формуле (7) на основе измерений глубины и напряжения на выходе приемника эхолота во время движения.

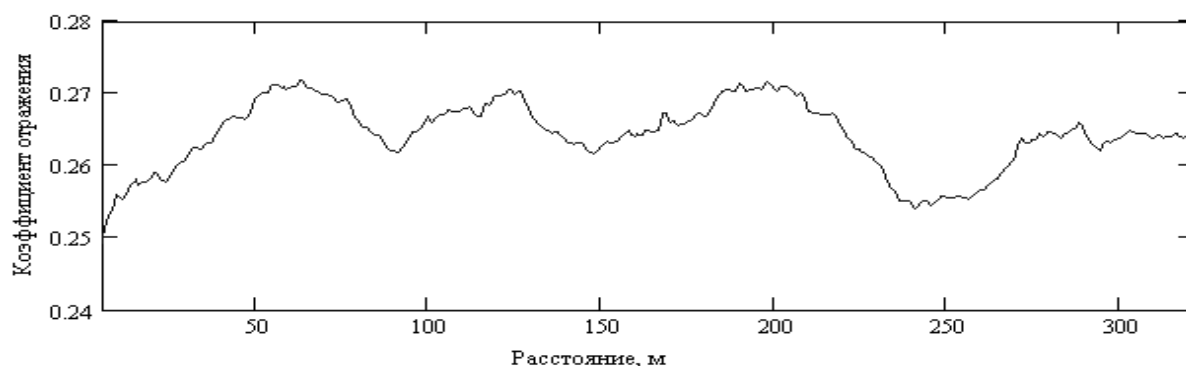


Рис. 5. График изменения значения коэффициента отражения от расстояния вдоль движения катера

Основываясь на результатах измерений, можно сделать вывод, что каждой точке морского дна соответствует свой рисунок слоев и коэффициент отражения по давлению для сферических волн. Сопоставляя рисунок слоев, коэффициент отражения и координаты места, где они были измерены, можно составить цифровую карту дна, которая будет использоваться для навигации подводных аппаратов.

Результаты работы можно использовать для навигации не только подводных аппаратов и систем, но и надводных судов, маневрирующих на мелководье в условиях стесненного судоходства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. М.Д.Агеева. М.: Наука, 2005. 320 с.
2. Короченцев В.И. Волновые задачи теории направленных и фокусирующих антенн. Владивосток: Дальнаука, 1998. 192 с.
3. Короченцев В.И., Розенбаум А.Н. Анализ и синтез систем связи управления движением подводных объектов по аномалиям физических полей. Владивосток: Дальнаука, 2007. 188 с.