

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭХОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИНСПЕКЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ

А.В. Инзарцев, А.М. Павин

Институт проблем морских технологий  
ДВО РАН  
Владивосток

## ВВЕДЕНИЕ

Задача периодического обследования (инспекции) искусственных подводных протяженных объектов (ИПО) с течением времени становится всё более острой. Связано это с распространением хозяйственной деятельности на глубоководные зоны океанов и, как следствие, с возрастающим количеством подводных коммуникаций. Примером может служить необходимость инспекции подводных трубопроводов (ТП) при обеспечении деятельности морской нефтегазовой индустрии. Обычно для этих целей применяют надводные суда и буксируемые подводные аппараты, но качество получаемых ими данных не всегда позволяет вовремя заметить ситуации, требующие вмешательства человека. Перспективным решением задачи инспекции подводных объектов является применение автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА) в качестве «интеллектуальных носителей» обзорно-поисковой аппаратуры.

Согласно [1] основными задачами инспекции трубопровода являются:

- 1) определение положения (подвижки ТП);
- 2) обнаружение и измерение провисов;
- 3) обнаружение обнажения ТП (толщина засыпки) и проверка состояния утяжеляющего покрытия;

4) осмотр рельефа по сторонам ТП и обнаружение посторонних предметов;

5) обнаружение повреждений ТП и соединений;

6) оценка состояния катодной антикоррозийной защиты;

7) обнаружение утечки транспортируемых веществ.

Инспекция ТП состоит из двух этапов: поискового (обнаружение ТП) и инспекционного (движение вдоль трубопровода с проведением необходимых измерений).

При выполнении инспекции помимо задачи идентификации объекта требуется точное определение взаимного положения АНПА и ИПО в реальном времени. Для этого АНПА должен быть основательно оснащен информационно-измерительными системами. Например, предлагается использовать в различных комбинациях видеоаппаратуру, гидролокатор секторного обзора (ГСО), акустический профилограф, электромагнитный искатель (ЭМИ) и магнитометр. Однако в этих случаях всегда возникают определённые сложности. Применение фото- и видеоаппаратуры не всегда возможно из-за вероятной мутности воды, особенно вблизи берега и в проливах. Электромагнитный искатель [2] и магнитометр могут использоваться лишь для определения факта нахождения АНПА в окрестности ТП, по-

скольку при движении вдоль трубопровода генерируют сигналы сложной и неоднозначной формы, зависящей к тому же от многих внешних условий. Для обеспечения надежных результатов с применением ЭМИ АНПА должен двигаться над объектом с многократным его пересечением («зигзагом» [1], что не всегда устраивает. Для электрических ИПО использование ЭМИ вообще невозможно.

В целом наиболее надежные результаты дают акустические средства. В зарубежных работах упоминаются методы определения взаимной ориентации АНПА и ТП по данным многолучевых эхолокационных систем (ЭЛС) [3]. Для обнаружения ТП используются текущие данные ЭЛС, однако при этом рассматриваются лишь случаи поперечной к трубе ориентации лучей ЭЛС (т. е. движение АНПА вдоль трубопровода). Для остальных вариантов взаимной ориентации АНПА и ТП результаты использования предлагаемых методов в [3, 4] не описаны.

Эффективность многолучевой ЭЛС может быть существенно повышена, если использовать для идентификации ИПО данные, накопленные за некоторый предыдущий интервал времени. При этом многолучевая ЭЛС не только обеспечивает движения вдоль ИПО, но и обнаруживает его во время поиска.

В данной работе рассматриваются задачи идентификации (выделения) подводного протя-

женного объекта и формирования управления АНПА во время инспекции видимого участка ИПО с использованием данных от ЭЛС с несколькими лучами.

### 1. ИДЕНТИФИКАЦИИ ИПО ПО ДАННЫМ ЭЛС

АНПА оснащаются эхолокационными системами для организации движения и сбора информации вблизи грунта. Наибольшее распространение получили многолучевые ЭЛС как с фиксированными диаграммами направленности, так и с электронной разверткой. В данной работе предполагалось, что АНПА оснащен ЭЛС с несколькими лучами (до 10) с фиксированной ориентацией линий визирования по отношению к корпусу АНПА. Дальнейшее увеличение количества лучей связано с установкой на АНПА многолучевой ЭЛС с электронным сканированием, что, однако, принципиально не меняет описываемый подход. Лучи ЭЛС веерообразно направлены вниз в некотором секторе. Эхолокационные данные представляют собой набор откликов от поверхностей раздела сред вода-грунт (рис.1).

Распознавание инспектируемого объекта состоит из следующих этапов:

1. На основе информации от ЭЛС и навигационной системы АНПА строится модель внешней среды АНПА. Задача идентификации инспектируемого объекта сводится к распознаванию (акустически) видимой части объекта на фоне дна.

2. Априорно известная форма инспектируемого объекта «примеряется» к обследованной части дна с помощью алгоритма на основе нечеткой логики. Устанавливается вероятность нахождения объекта в обследованной части поверхности дна.

3. Определяется взаимное расположение АНПА и объек-

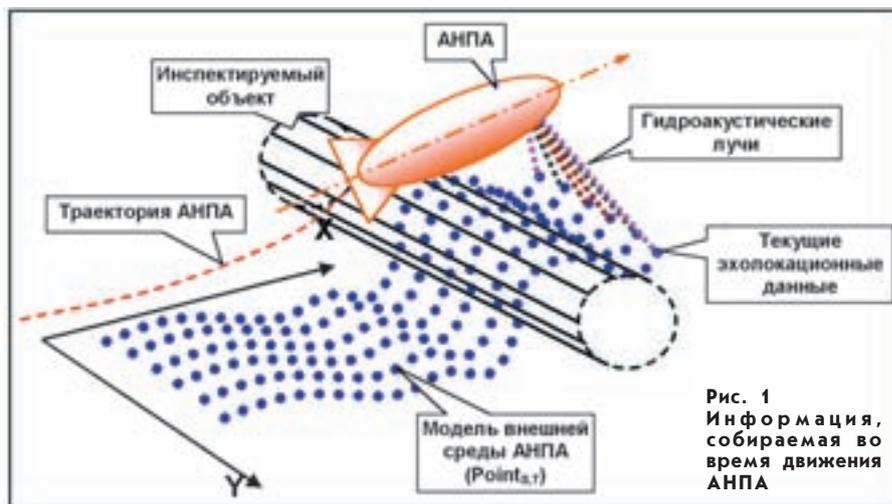


Рис. 1  
Информация, собираемая во время движения АНПА

та. Результатом является величина поперечного смещения ИПО относительно АНПА. Да-

лее эта величина используется для формирования управления АНПА.

#### 1.1. Модель внешней среды АНПА

В общем случае описание морского дна и располагающихся на нем объектов не всегда может быть представлено в виде простой карты высот. Это связано с возможным наличием образований типа «пещера» (например, в случае провисов трубопровода). Поэтому в основу модели положено параметрическое опи-

сание поверхности дна  $Point_{s,t}$  (зависимость координат точек рельефа  $S$  от времени  $T$ ) (рис.1).

Координаты точек рельефа рассчитываются исходя из данных навигационной системы /НС/ АНПА, известного положения антенн ЭЛС на борту аппарата и их показаний в каждый момент времени:

$$Point_{s,t} = \begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} + rotate \left[ \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} + rotate \left[ \begin{pmatrix} Dist_{s,t} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \alpha_S \\ \beta_S \\ 0 \end{pmatrix} \right], \begin{pmatrix} \phi_T \\ \psi_T \\ \theta_T \end{pmatrix} \right],$$

где  $[X_T; Y_T; Z_T]$  и  $[\phi_T; \psi_T; \theta_T]$  – шестимерный вектор положения АНПА в момент времени  $T$  в абсолютной системе координат,  $X_T$  – долгота,  $Y_T$  – широта,  $Z_T$  – глубина,  $\phi_T$  – курс,  $\psi_T$  – дифферент,  $\theta_T$  – крен;

■  $[X_S; Y_S; Z_S]$  и  $[\alpha_S; \beta_S]$  – положение и направление эхолокационного датчика  $S$  в связанной системе координат АНПА;

■  $Dist_{s,t}$  – показание (дистанция) эхолокационного датчика  $S$  в момент времени  $T$ ;

■  $rotate ([x; y; z], [\phi; \psi; \theta])$  – функция поворота системы координат вектора  $[x; y; z]$  на курсовой угол  $\phi$ , угол дифферента  $\psi$  и крена  $\theta$ .

Модель имеет ограниченный размер (при реализации она организуется как кольцевой стек), поскольку для выделения участка ИПО используются данные, собранные за последние несколько десятков секунд движения. НС АНПА для подобных работ оснащается высокоточной системой счисления на основе инерциальной навигационной системой (ИНС) с коррекцией от доплеровского лага. Относительно малая ошибка координат, набегаящая за это время, учитывается при реализации нечетких правил выделения объекта (см. следующий пункт).

### 1.2. Идентификация протяженных объектов на фоне дна

В работах [5, 6] рассматривался метод идентификации трубопровода круглого сечения известного радиуса. Был применен алгоритм, позволяющий задавать произвольное сечение протяженного объекта. Используемый метод идентификации в своей основе имеет модель нечеткой логики, при этом функции принадлежности для описания формы инспектируемого объекта имеют вид функций двух переменных. Предполагается, что протяженный объект однозначно определяется формой поперечного сечения. Можно найти области возможных откликов ЭЛС в районе объекта. Эти области определяют нечеткие значения «Поверхность» и «Неповерхность» для всех откликов в районе искомого объекта. При этом функции принадлежности нечетких величин лежат в пределах от нуля до единицы (рис. 2, 3).

Для оценки вероятности  $Pr([X;Y;Z])$  существования инспектируемого объекта в некоторой точке пространства  $[X;Y;Z]$  вычисляются значения проекций  $Dx([X;Y;Z],S,T)$  и  $Dy([X;Y;Z],S,T)$  точек поверхности дна  $Point_{s,t}$  на плоскость, перпендикулярную направлению объекта инспекции, с центром координат в точке  $[X;Y;Z]$ . После этого определяются оценки вероятности  $P(Dx,Dy)$  для каждой точки исходя из следующих нечетких правил.

1. Вероятность существования искомого объекта в точке с координатами  $[X;Y;Z]$  тем выше, чем больше точек  $Point_{s,t}$  принадлежит его поверхности в данной точке:

если «Точка» = «Поверхность», то  $P(Dx,Dy,S,T) = P_{true}$ .

2. Если точки поверхности дна  $Point_{s,t}$  лежат там, где они

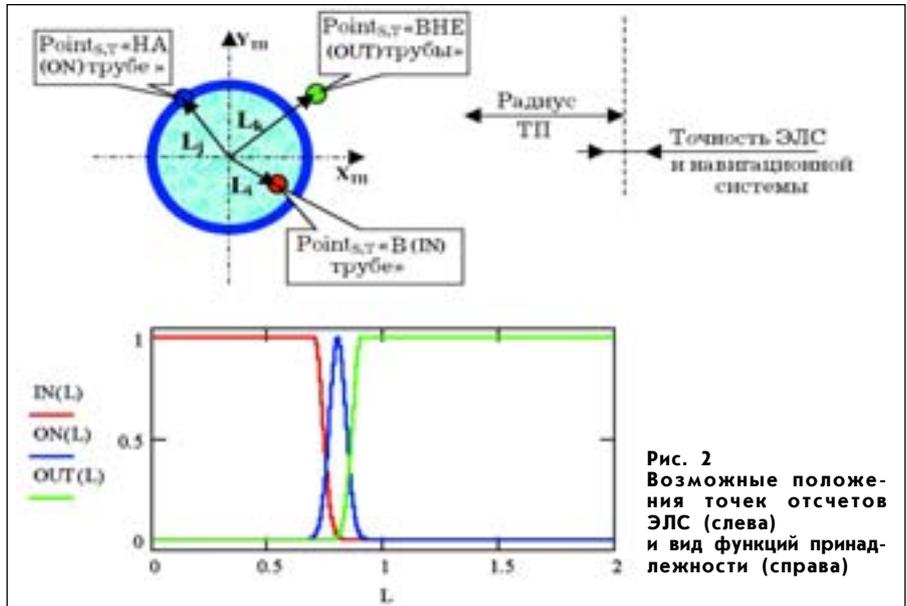


Рис. 2 Возможные положения точек отсчетов ЭЛС (слева) и вид функций принадлежности (справа)

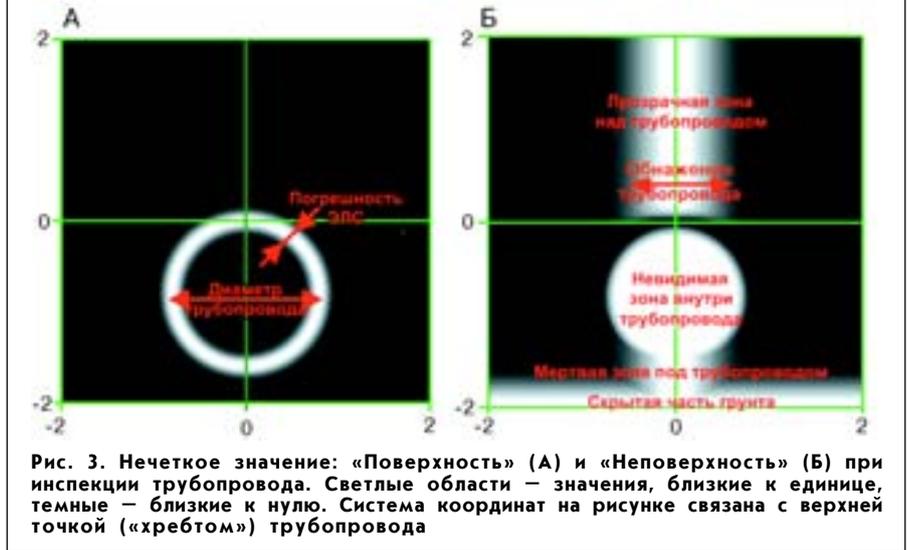


Рис. 3. Нечеткое значение: «Поверхность» (А) и «Неповерхность» (Б) при инспекции трубопровода. Светлые области – значения, близкие к единице, темные – близкие к нулю. Система координат на рисунке связана с верхней точкой («хребтом») трубопровода

не могут находиться (внутри объекта, непосредственно под ним и т. д.), то вероятность существования искомого объекта в точке  $[X; Y; Z]$  мала:

если «Точка» = «Неповерхность», то  $P(Dx,Dy,S,T) = P_{false}$ .

Расчет значений оценки вероятности для каждой точки производится следующим образом:

$P(Dx,Dy) = P_{true} \times \text{«Поверхность»}(Dx,Dy) + P_{false} \times \text{«Неповерхность»}(Dx,Dy)$ , где значения  $P_{true}$  и  $P_{false}$  подбираются исходя из соотношения коли-

чества сбойных данных на единицу верных ( $P_{false}/P_{true}$ ).

Общая оценка вероятности нахождения искомого объекта в точке  $[X;Y;Z]$  в момент времени  $T$  определяется как сумма оценок каждой из точек поверхности дна. После чего эта величина нормируется нелинейной ограниченной функцией в отрезок  $[-1;+1]$  (отрицательные значения соответствуют степени уверенности в отсутствии искомого объекта, положительные – присутствию, а ноль – неопределенности):

$$Pr(T) = th \left[ \sum_S \sum_{t=T-dT}^T P \left[ Dx \left[ \begin{matrix} X \\ Y \\ X \end{matrix} \right], S, t, Dy \left[ \begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} \right], S, t \right] \right]$$

где суммирование ведется по всем эхолокационным датчикам  $S$  и ближайшему временному интервалу  $dT$ , а величины  $Dx([X;Y;Z], S, T)$ ,  $Dy([X;Y;Z], S, T)$ ,  $P(Dx, Dy)$  определены выше.

Окончательное решение о существовании inspected объекта выносится после порогового разделения: если  $P > P_{min}$ , то объект идентифицирован. Здесь  $P_{min}$  – достаточное значение вероятности для идентификации объекта инспекции.

### 1.3. Определение взаимного расположения АНПА и объекта

При определении взаимного расположения АНПА и ИПО ключевым является расчет бокового смещения подводного робота относительно объекта инспекции. Эта величина используется в регуляторах дви-

Особенность разработанной модели состоит в том, что функции принадлежности могут формироваться для объекта произвольной формы. Таким образом, имеется возможность идентифицировать такие протяженные объекты, как, например, траншея. Описание искомого объекта может задаваться и аналитически (для объектов простой формы), и таблично. В последнем случае можно использовать процедуру автоматического заполнения таблицы, представляя АНПА образец для распознавания.

жения АНПА во время движения подводного робота вдоль inspected объекта. Для нахождения указанной величины ( $Offset(T)$ ) используется следующее выражение (точнее, его дискретный аналог):

$$Offset(T) = \frac{\iiint \Pr \begin{bmatrix} X \\ Y \\ X \end{bmatrix}, T \times diametral \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \phi_T \\ \psi_T \\ \theta_T \end{bmatrix} dXdYdZ}{\iiint \Pr \begin{bmatrix} X \\ Y \\ X \end{bmatrix}, T dXdYdZ};$$

где интегрирование производится по точкам  $[X;Y;Z]$  пространства, для которых объект инспекции считается идентифицированным:  $Pr([X;Y;Z], T) > P_{min}$ ;

$diametral()$  – функция вычисления поперечной координаты точки поверхности дна  $[X;Y;Z]$  в системе координат АНПА  $[X_T; Y_T; Z_T]$  и  $[\phi_T; \psi_T; \theta_T]$ .

## 2. ПОВЕДЕНИЕ АНПА ПРИ ИНСПЕКЦИИ ОБЪЕКТА

### 2.1. Этап поиска

Поведение АНПА при поиске и обнаружении ИПО похоже на поведение аппарата при поиске кабеля [5]. Алгоритм формирования поведения состоит из следующих шагов (рис. 4):

1) осуществление поисковой траектории (меандра) в предполагаемом районе прокладки ИПО до пересечения с объектом, напоминающим искомым;

2) попытка получить ещё два подтверждающих контакта от объекта. Для этого при каждом пересечении (контакте) АНПА меняет направление своего движения на противоположное, т.е. движется «зигзагом». Основной задачей этого маневра является отсеивание ложных контактов;

3) если точек пересечения 3, они лежат на одной прямой и направление этой прямой совпадает с направлением искомого объекта, – ИПО считается обнаруженным, и начинается этап его отслеживания. В противном случае контакт считается ложным и АНПА возвращается к выполнению поисковой траектории (пункт 1).

### 2.2. Движение АНПА вдоль объекта

После обнаружения объекта и определения его ориентации АНПА переходит к инспекционной фазе. В литературе задача инспекции ТП не формализована и обычно ограничивается списком желаемых действий со стороны АНПА. В данной работе предлагается следующая последовательность действий АНПА:

- движение непосредственно над трубопроводом для контроля утечек транспортируемых веществ (обычно для этих целей используется датчик метана) и выполнения видеосъемки его

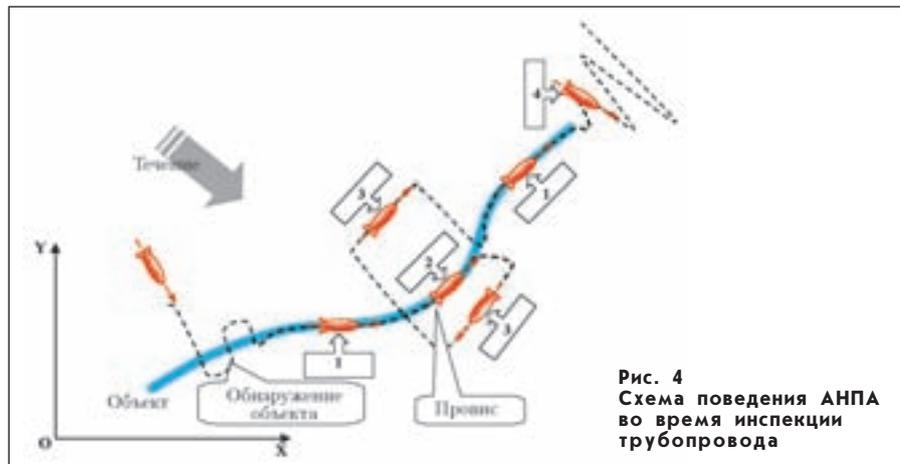


Рис. 4  
Схема поведения АНПА во время инспекции трубопровода

поверхности, а также ГБО-съемки по обеим сторонам ТП для обнаружения посторонних предметов. Во время движения по данным ЭЛС также обнаруживаются провисы, и оценивается их длина;

- \* отход в сторону от ТП с движением назад для выполнения ГБО-съемки провиса в случае его обнаружения;

- \* возвращение к трубопроводу для последующей инспекции.

Основные задачи инспекции могут быть достигнуты при движении АНПА над ТП на высоте 1–3 м. Таким образом, задача инспекции реализуется в виде следующего алгоритма (рис. 4).

**Шаг 1.** АНПА движется над центром трубопровода, при этом постоянно уточняется местоположение ТП с использованием описанного выше алгоритма. В это же время осуществляется сбор данных (видеосъемка, анализируется состав воды и т. п.). В случае потери трубопровода происходит переход к шагу 4.

В вертикальной плоскости АНПА движется в режиме стабилизации глубины (для обеспечения ровного движения аппарата при проходе над ТП), при этом заданная глубина движения  $D_{АНПА}$  определяется следующим образом:

$$D_{АНПА} = D_{ТП} - R_{ТП} - H_{const},$$

где:

$D_{ТП}$  – глубина залегания оси ТП (рассчитывается исходя из координат ТП),

$R_{ТП}$  – радиус трубопровода,

$H_{const}$  – заданная высота движения над трубопроводом.

В горизонтальной плоскости управление АНПА формируется по аналогии с управлением при отслеживании маркерной линии. Для этих целей учитываются позиционные ошибки по смещению АНПА относительно объекта  $\Delta d$  и курсу  $\Delta\varphi$ . При этом  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{mean}$ , где  $\varphi_{mean}$  – скользящее среднее курса АНПА в течение некоторого вре-

менного интервала ( $t_0^t$ ), а  $\varphi$  – текущий курс АНПА.

**Шаг 2.** При обнаружении провиса (координаты точки начала провиса запоминаются) АНПА продолжает движение до тех пор, пока провис не закончится. Если длина провиса незначительна, то повторяется шаг 1, в противном случае производится переход на шаг 3.

Обнаружение провиса выполняется исходя из верности следующего неравенства:

$$D_{дно} - D_{ТП} > R_{ТП},$$

где

$D_{дно}$  – глубина донной поверхности вблизи ТП,

$D_{ТП}$  – глубина залегания оси ТП (рассчитывается исходя из координат ТП),

$R_{ТП}$  – радиус трубопровода.

**Шаг 3.** Производится обследование ТП с помощью высокочастотного ГБО. Для этого АНПА отходит в сторону от ТП

по течению (поскольку провисы обычно образуются в местах с наличием течения 1) и использует высокочастотный ГБО для съемки провиса сбоку. Далее аппарат возвращается к началу провиса параллельно трубопроводу. Затем АНПА переходит на другую сторону ТП на безопасное расстояние и производит ГБО съемку обратной стороны ТП до места окончания провиса. После этого АНПА возвращается к отслеживанию ТП дальше за провисом (шаг 1).

**Шаг 4.** Если потерян контакт с трубопроводом, то АНПА начинает совершать маневр «расходящийся зигзаг» вдоль генерального направления ТП. Если ТП обнаружен, то возобновляется выполнение шага 1. В противном случае АНПА возвращается к прерванной программе «меандр».

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АНПА

Для проверки адекватности и работоспособности описанных алгоритмов был проведен ряд численных экспериментов. При этом использовалось как стандартное программное обеспечение *MathCad*, так и специально разработанный программный комплекс *Underwater Robot*

*Simulator* [5]. Моделирующая среда включает в себя:

- \* трехмерную модель донной поверхности и искусственных объектов (трубопроводы и траншеи в нашем случае);
- \* динамическую и кинематическую модели АНПА;
- \* модель ЭЛС.

#### 3.1. Рельеф дна

Модель донной поверхности наряду с моделями искусственных объектов позволяет формировать любые формы рельефа (включая вогнутые и неоднозначные). Модель использует три уровня детализации. *Микроуровень* соответствует точности работы датчиков ЭЛС (сантиметры); *мезоуровень* – перемещениям аппарата за время обновления данных от ЭЛС (дециметры). *Макроуровень* описывает общие формы донной поверхности. Модель позволяет ус-

тановить отдельные характеристики для каждого из трех указанных уровней. Макрорельеф используется как основание, на которое помещаются элементы микро- и мезорельефа в соответствии с определенными правилами.

Описание донной поверхности задается с помощью параметрической вектор-функции. Математическая формулировка для генерации рельефа с необходимыми свойствами имеет следующий вид:

$$\text{Map}(a, b) = \text{Macro}(a, b) + \sum_{n=1}^N \text{A}(a, b) \left( \sin \left( \left| \frac{\text{Macro}(a, b) - \vec{P}_n}{|\vec{P}_n|} \right| \cdot F(a, b) \right) \wedge H(a, b) \right),$$

где  $Macro(a,b) = [Macro^x(a,b); Macro^y(a,b); Macro^z(a,b)]$  – исходный макрорельеф дна;

$$A(a,b) = [A^x(a,b); A^y(a,b); A^z(a,b)]$$

вектор «амплитуд», величина и направление искажений макрорельефа в районе с параметрами  $(a,b)$ ;

$F(a,b)$  – «частота» искажений в районе с параметрами  $(a,b)$ ;

$H(a,b)$  – «жесткость» искажений рельефа в районе  $(a,b)$ , определяет характер грунта (плавные переходы – песок или жесткие – скальные породы);

$P_n = [P_x, P_y, P_z]_n$  – координаты центров искажений, определяет «направленность» рельефа (например, волнообразный рельеф);

$N$  – число итераций, определяет разнообразность (насыщенность) рельефа.

На рис. 5 представлен пример сгенерированного рельефа морского дна. В качестве макрорельефа использовалось плавное углубление в центральной части. Частота перепадов увеличивается по направлению на восток, а «жесткость» рельефа – на север.

На рис. 5 представлен пример сгенерированного рельефа морского дна. В качестве макрорельефа использовалось плавное углубление в центральной части. Частота перепадов увеличивается по направлению на восток, а «жесткость» рельефа – на север.

Подробнее о моделировании рельефа см. в [6].

### 3.2. Работа эхолокационной системы

Для проведения экспериментов была разработана математическая модель, позволяющая имитировать работу как одиночного гидролокационного сонара, так и многолучевых комплексов. При этом учитывается большинство параметров ЭЛС:

- положение  $[X_s; Y_s; Z_s]$  и направление  $[\alpha_s; \beta_s]$  лучей  $S$  эхолокационной системы;
- $\rho_{min}, \rho_{max}$  – минимальное и

максимальное значения дальностей датчиков ЭЛС;

- $d_{ES}$  – ширина диаграммы направленности гидроакустических лучей;
- положение  $[X_T; Y_T; Z_T]$ , курс –  $\varphi_T$ , дифферент –  $\psi_T$  и крен –  $\theta_T$
- АНПА в текущий момент времени  $T$ .
- Модель ЭЛС позволяет производить расчет показаний датчиков как для рельефа, заданного картой высот  $z(x,y)$ , так и для

сложных объектов, заданных параметрической вектор-функцией  $Map(a,b) = [Map^x(a,b); Map^y(a,b); Map^z(a,b)]$  (например, козырьки, скосы с отрицательным уклоном, камни, траншеи, трубопроводы и т. д.).

Показания датчиков ЭЛС рассчитываются как минимальное (по параметрам  $a$  и  $b$ ) из всех возможных расстояний  $|R(a,b)_{s,T}|$  от точки крепления сенсора  $S$  к борту АНПА до точек рельефа  $Map(a,b)$  в момент времени  $T$ :

$$Dist_{s,T} = \min_{a,b} (|R(a,b)_{s,T}|)$$

При этом должны выполняться одновременно следующие два условия.

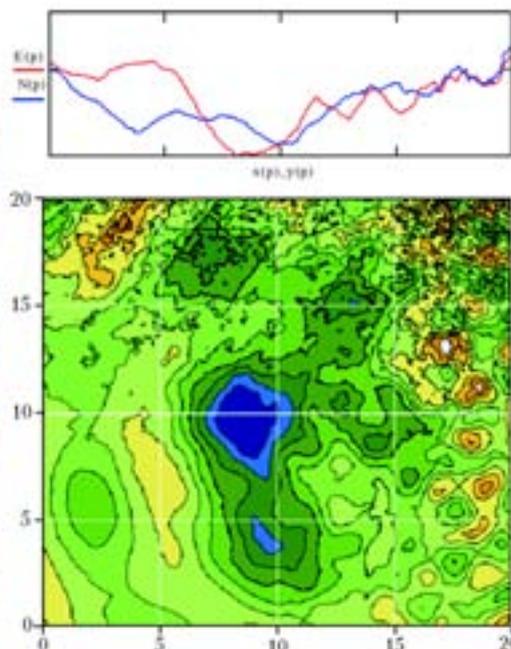
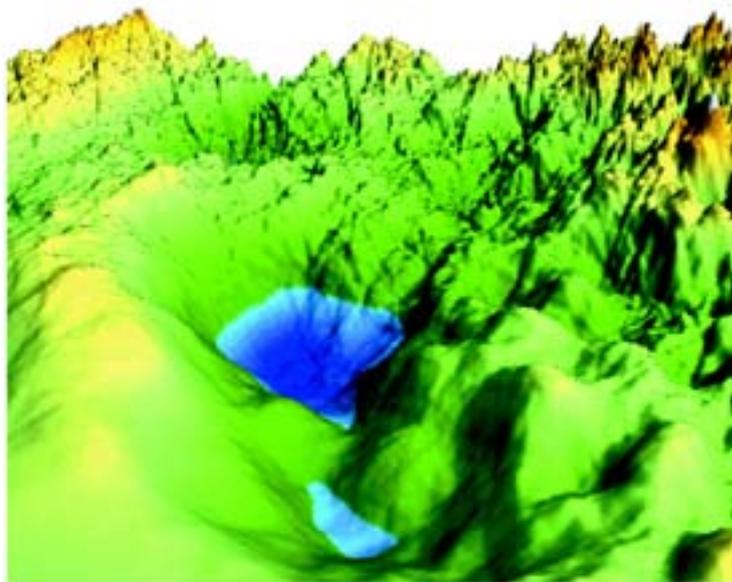
1. Полученное значение дистанции должно лежать в диапазоне чувствительности ЭЛС:

$$\rho_{min} \leq |R(a,b)_{s,T}| \leq \rho_{max}$$

2. Угол между направлением  $Q_{s,T}$  луча  $S$  ЭЛС в момент времени  $T$  и направлением до точек рельефа  $R(a,b)_{s,T}$  не должен превышать ширины диаграммы направленности  $\delta_{ES}$ :

$$\frac{|R(a,b)_{s,T}| \cdot |Q_{s,T}|}{|R(a,b)_{s,T}| \cdot |Q_{s,T}|} \geq \cos(\delta_{ES})$$

Рис. 5  
Сгенерированная поверхность дна. Слева – общий вид, справа – план, сверху – продольный и поперечный разрезы



### 3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Проверка работоспособности алгоритмов распознавания и инспекции протяженных объектов проводилась для двух объектов: трубопровода круглого сечения и траншеи прямоугольного сечения. Общие параметры моделирования представлены в табл.1.

Таблица 1. Параметры модельных экспериментов

Описание параметра	Значение
Количество лучей ЭЛС	10
Угол наклона веера лучей в вертикальной плоскости	60°
Покрытие поверхности дна веером лучей в горизонтальной плоскости	±20°
Угол диаграммы направленности каждого из лучей	±2°
Точность датчиков ЭЛС по дальности	±2 см
Частота обновления данных ЭЛС (для группы эхолотов)	2 Гц
Средняя скорость АНПА при обследовании	0,5 м/с
Средняя высота над грунтом	3 м
Средняя величина заглубления трубопровода в грунт	50%
Диаметр трубопровода	1,6 м
Средняя глубина траншеи	1 м
Средняя ширина траншеи	2 м

Задача АНПА состояла в обнаружении объекта, движении вдоль него, нахождении и оконтуривании провиса (для трубопровода). Были протестированы различные варианты рельефа, положения объектов и ЭЛС с различным количеством лучей.

На рис. 6–8 представлена схема проведения одного из экспериментов.

Первоначально АНПА двигался на восток (из левой нижней части планшета) до контакта с объектом, напоминающим искомый (рис. 6). Затем он изменил направление движения, получил дополнительные подтверждающие контакты и определил, что заданный объект обнаружен. Полоска синего цвета переменной ширины вдоль траектории движения АНПА показывает уровень покрытия

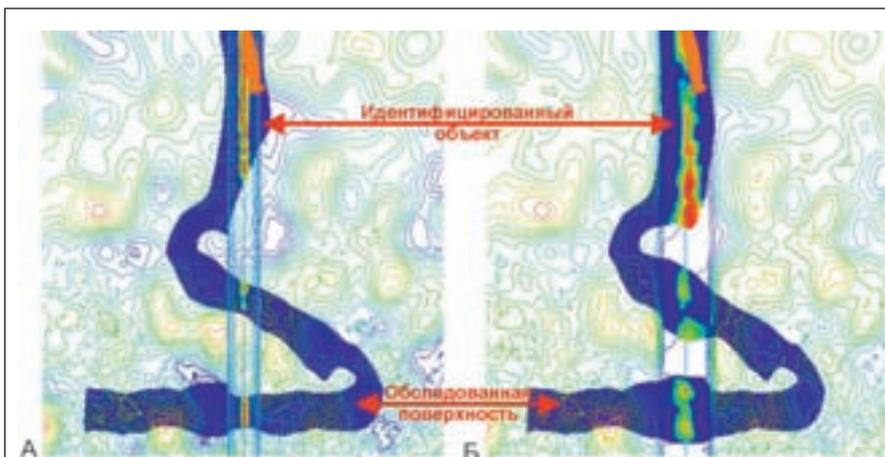


Рис. 6 Обнаружение: трубопровода (А) и траншеи (Б). Оценка вероятности наличия объекта показана областями с цветом от зеленого до красного (наивысшая вероятность). Размер стороны планшета около 25 м

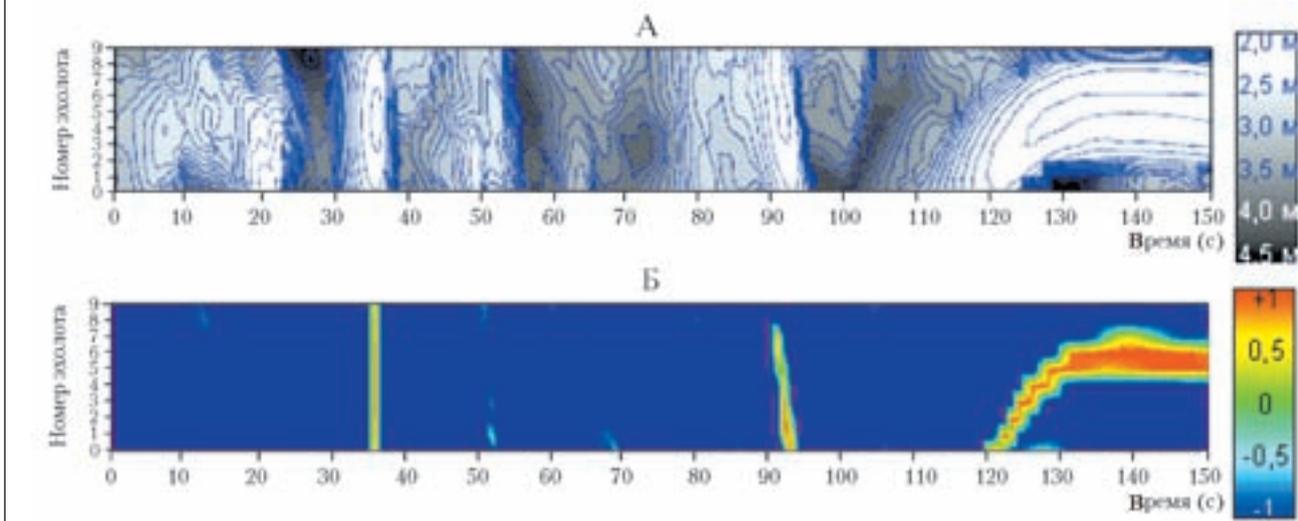
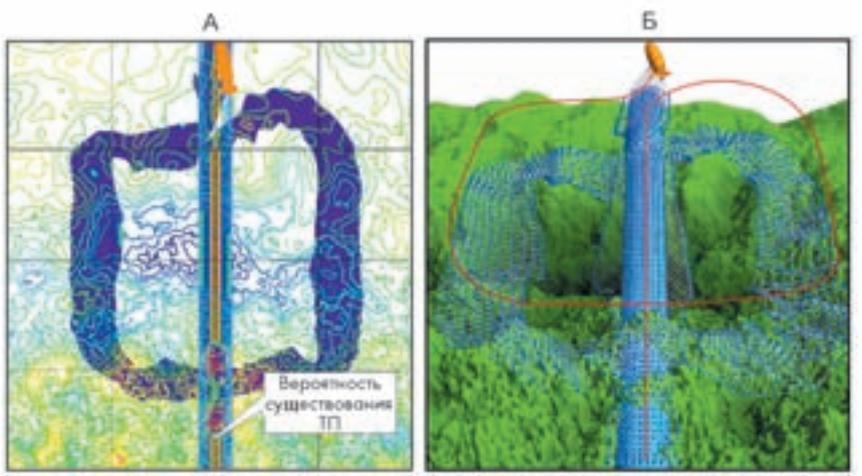


Рис. 7 Процесс обнаружения трубопровода. А – карта дальностей веера ЭЛС (светлый – малое расстояние, темный – большое). Б – вероятностная оценка наличия искомого объекта (красный – высокая, синий – низкая)

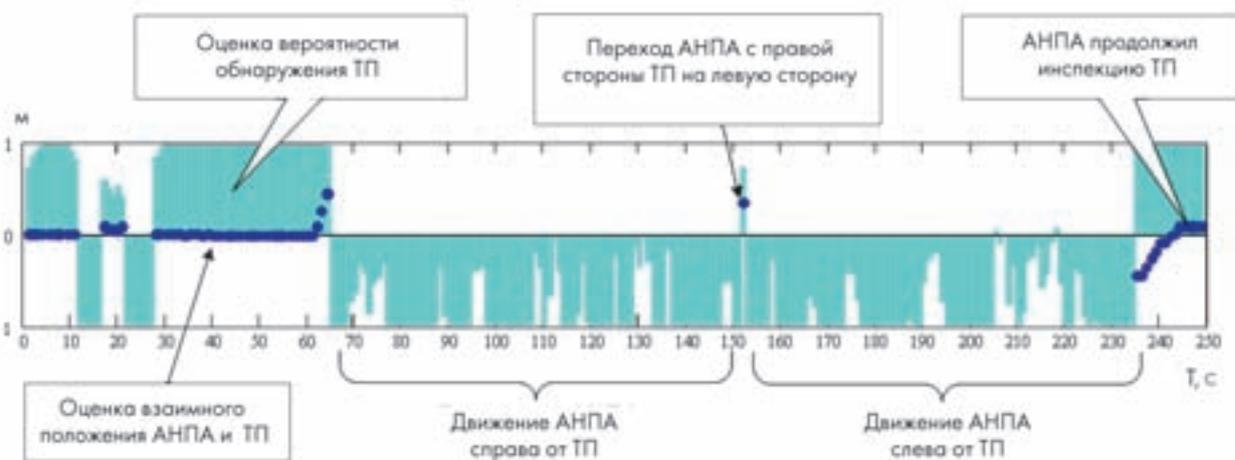
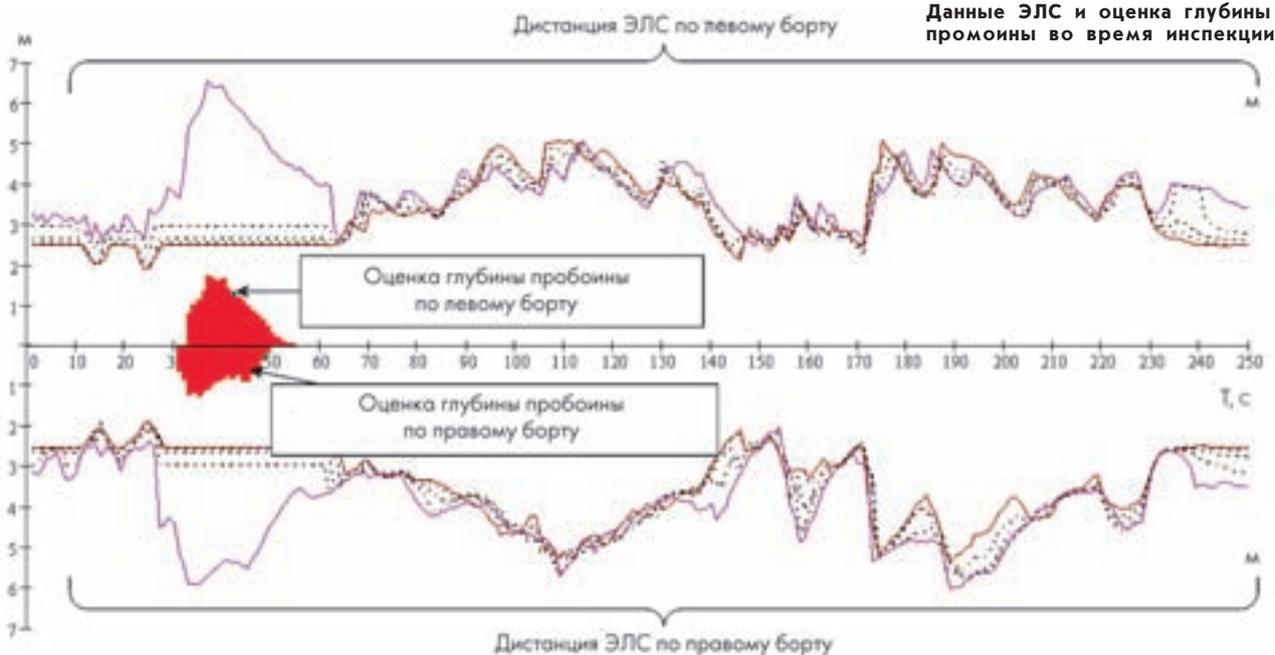
**Рис. 8**  
Оконтуривание провиса. АНПА движется снизу вверх.  
А – вид сверху, Б – общий вид с отснятыми показаниями ЭЛС



поверхности веером лучей ЭЛС. Рисунок 7 дает дополнительную информацию, иллюстрирующую процесс обнаружения трубопровода.

На рис. 8 представлен процесс проведения инспекции. Изображено движение АНПА вдоль трубопровода, а также обнаружение и обследование провиса. После завершения оконтуривания провиса АНПА возобновил движение вдоль трубопровода.

**Рис. 9**  
Данные ЭЛС и оценка глубины промоины во время инспекции



**Рис. 10**  
Интегральная оценка идентификации объекта (столбцы: +1 – объект точно идентифицирован, -1 – объекта точно нет) и оценка взаимного положения АНПА и ТП (точки: +1 – по левому борту, -1 – по правому борту)

Данные ЭЛС во время обследования промоины (по 5 лучей ЭЛС с каждого борта) представлены на рис.9. Рисунок иллюстрирует результат автоматического распознавания промоины на основе этих данных.

На рис.10 представлены результаты расчета смещения ТП относительно АНПА. Рисунок иллюстрирует вероятность присутствия трубопровода в поле зрения ЭЛС. Предполагается, что трубопровод «существует»,

если эта величина положительна. В этом случае вычисляется смещение ТП относительно корпуса АНПА (синие точки на графике) и далее используется для формирования управления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный метод инспекции ТП ориентирован на использовании существующей акустической аппаратуры, которой оснащаются разработанные в ИПМТ ДВО РАН аппараты. Результаты моделирования позволяют оптимистично оценивать

возможность использования рассмотренных алгоритмов для решения проблем инспекции трубопроводов и других протяженных объектов. Область применимости метода (возможность обнаружения менее габаритных и более скрытых объектов) может

быть существенно расширена при использовании ЭЛС с большим количеством лучей или сканирующих локаторов. При использовании разработанных алгоритмов желательно предусмотреть возможность задания формы искомого объекта во время формирования оператором миссии АНПА.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д. Оснащение и управление АНПА при обследовании подводных трубопроводов // Подводные технологии. Владивосток: Дальнаука, 2005. № 1. С. 68–72.
2. Агеев М.Д., Кукарских А.К. Электромагнитный гидролокатор для обнаружения и отслеживания протяженных объектов с борта АНПА // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2001. Вып. 4.
3. Petillot Y.R., Reed S.R., Bell J.M. Real time AUV pipeline detection and tracking using side scan sonar and multi-beam echosounder // Oceans '02 MTS/IEEE, V.: 1. Oct. 29–31. 2002. P. 217–222.
4. Evans J., Petillot Y., Redmond P., Wilson M., Lane D. «AUTOTRACKER: Real-Time Architecture for Pipeline and Cable Tracking on AUVs» // 13<sup>th</sup> International Symposium On Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST03).
5. Pavin A.M. Simulation Environment for AUV Control Algorithms Development // Proceedings of 14<sup>th</sup> International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST05). August 21–24, 2005. Durham, New Hampshire, USA.
6. Pavin A.M. The Pipeline Identification Method Basing on AUV's Echo-Sounder Data // Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference, September 18-21. Boston, MA, USA, 2006.

