

УДК 681.883:551.462.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

А.Е. Хмельнов
В.В. Золотарёв

Институт динамики систем и теории
управления СО РАН, Иркутск¹
Институт проблем морских технологий
ДВО РАН, Владивосток²

На основе анализа принципов работы гидролокатора бокового обзора (ГБО) рассмотрены вопросы моделирования гидролокационных изображений. Показано, что для отладки алгоритмов распознавания гидролокационных образов и принятия на их основе решений на борту автономного подводного аппарата в ряде случаев более приемлемы смоделированные изображения. На базе трёхмерной компьютерной графики и графических ускорителей разработаны технологии генерации модельных ГБО-изображений с использованием шейдеров, позволяющие создавать весьма реалистичные модели.

ВВЕДЕНИЕ

На необитаемых подводных аппаратах (НПА) в качестве дистанционных поисковых средств дальнего действия преимущественное распространение получили гидролокаторы бокового обзора (ГБО), которые наряду с фототелевизионными устройствами составляют основу систем технического зрения (СТЗ). Структура ГБО-изображений близка к структуре фотоизображений, но по параметрам разрешающей способности и дальности действия эти системы имеют противоположные свойства. Так, дальность действия фотосистем составляет несколько метров, а ГБО – от 50 м (для высокочастотных локаторов с сантиметровой разрешающей способностью) до 1 км (для среднечастотных локаторов с разрешением по дальности около 1 м). В связи с этими особенностями ГБО традиционно используют в качестве высокопроизводительного средства первичного поиска и целеуказа-

ния, по данным которого далее осуществляются фототелевизионный досмотр отобранных целей и их идентификация. Надо отметить, что благодаря постоянному совершенствованию ГБО и методов обработки гидролокационной информации ряд характерных объектов, особенно крупноразмерных, удаётся идентифицировать и непосредственно по результатам ГБО-обзора. Появились работы, свидетельствующие о возможности прямого использования эхограмм ГБО для распознавания образов, для анализа сцен, для принятия решений в ходе миссии АНПА. Эти задачи находятся в стадии решения, отладки методик и алгоритмов. Обычно отладка выполняется на базе реальных гидролокационных изображений. В ИПМТ ДВО РАН накоплен большой объём гидролокационных данных, полученных на глубинах Мирового океана от 0,5 м до 6000 м, практически на всех видах подводного рельефа, с регистрацией самых разнообразных

естественных и искусственных объектов. Для разработки более сложных алгоритмов анализа ГБО-изображений необходимо иметь большую экспериментальную базу, позволяющую тестировать предлагаемые алгоритмы. Однако на практике использование реальных эхограмм ГБО для отладки алгоритмов распознавания и управления сопряжено с определёнными трудностями. Отметим некоторые из них.

1. Файлы, содержащие интересную для отладки информацию, составляют лишь малую часть от общего большого объёма архивных данных, но систематизированной базы данных, гарантирующей высокую скорость поиска нужных ГБО-объектов, не существует.

2. Размеры большинства файлов, полученных в ходе

¹ 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, тел.: (3952) 427100, факс: (3952) 511616, e-mail: idstu@icc.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (4232) 432416, e-mail: lab32imtp@marine.febras.ru

маршрутных съёмок, превышают 100 Мбайт, но отдельные файлы, записанные на длинных галсах, имеют размеры до 550–600 Мбайт. Работа с файлами таких размеров неудобна, затратна по времени и требует специальных действий для выделения необходимых фрагментов изображений с сопутствующими (прежде всего навигационными) данными.

3. При отработке некоторых алгоритмов желательно в едином поле ГБО-обзора иметь сочетание нескольких разнородных объектов, но в реальности такое сочетание – редкость.

4. Для отладки представляют интерес гипотетические гидролокационные изображения, важные для принятия решений на борту АНПА при возникновении нештатных (аварийных) ситуаций. Реальных файлов такого содержания нет.

5. Информативность ГБО-изображения существенно зависит от ракурса обзора. Однако важно, чтобы результативность распознавания искомого подводного объекта на эхограмме была бы максимальной и не зависела от ракурса. Но большинство реальных эхограмм ГБО записано в весьма ограниченных условиях съёмки, поэтому отладку алгоритмов надёжного распознавания лучше проводить на модельных изображениях, перебирая все возможные ракурсы обзора.

Таким образом, особую актуальность для тестирования алгоритмов приобретает задача построения модельных ГБО-изображений, которые по своим характеристикам должны быть похожими на реальные.

Имеются работы, например [1], в которых для получения моделей ГБО-изображений используется метод трассировки лучей. Этот метод обладает рядом достоинств, позволяющих моделировать достаточно реалистичные изображения,

однако он вычислительно трудоёмок. Поэтому при построении on-line изображений трёхмерных сцен на компьютере метод трассировки лучей не используется, вместо него применяются различные приёмы работы с графическим ускорителем, которые позволяют получить достаточно реалистичные изображения за гораздо более короткое время.

В ИДСТУ СО РАН разработана программная система для моделирования внешней среды подводного аппарата [2]. Модель среды позволяет задавать подводный рельеф, размещать в этой среде модели подводных объектов и воспроизводить работу различных датчиков аппарата, в первую очередь – эхолота.

В данной работе рассматриваются особенности реализации алгоритма быстрой генерации модельных ГБО-изображений в модели внешней среды подводного аппарата с использованием графических ускорителей. Предлагаемый алгоритм не имитирует многолучевое распространение сигнала, обусловленное в том числе многократными отражениями звука на мелководных трассах. Но для глубоководных аппаратов данная проблема не столь актуальна.

■ Принципы моделирования работы ГБО

Принцип действия ГБО детально описан во многих работах, например в [3], поэтому здесь он повторён лишь кратко. В основу действия ГБО положен принцип сканирования поверхности дна узконаправленным акустическим лучом, перемещаемым в водной среде путём поступательного движения носителя антенны (см. рис. 1). Антенна 1 обладает веерообразной диаграммой направленности 3, широкой ($\theta_B \cong 40\text{--}60^\circ$) в вертикальной плоскости и узкой ($\theta_r \leq 1\text{--}2^\circ$) в горизонтальной. Последний параметр определяет угловое разрешение ГБО. Ось диаграммы направленности (ДН) ориентирована вбок перпендикулярно курсу носителя 2 и наклонена в сторону дна.

Приёмопередающая антенна излучает зондирующие посылки длительностью τ с периодом повторения (зондирования) T . Каждая зондирующая посылка в пространстве образует акустический «волновой пакет» 5, движущийся в воде со скоростью звука c в направлении P . Его размер в направлении распространения $\Delta r = c \cdot \tau / 2$ определяет разрешающую способность ГБО по дальности. По мере распространения последовательности «волновых пакето-

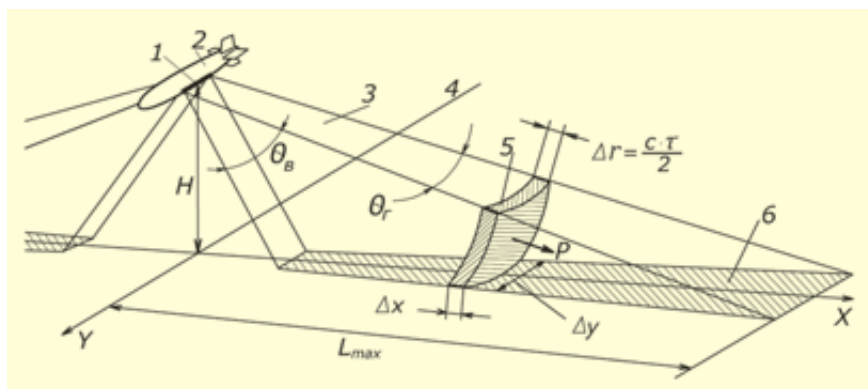


Рис. 1. Схема зондирования дна методом бокового обзора: 1 – приёмопередающая антенна ГБО, 2 – носитель антенны (АНПА), 3 – идеализированная диаграмма направленности антенны, 4 – проекция траектории движения носителя, 5 – зондирующая посылка в виде акустического «волнового пакета», 6 – участок дна, озвучиваемый за один цикл зондирования

тов» в пространстве ими поочередно в пределах диаграммы направленности озвучиваются узкие клиновидные полосы дна 6, вытянутые перпендикулярно к проекции траектории перемещения антенны 4. Если t_0 – момент излучения зондирующей посылки, то момент возвращения первого донного отклика определится выражением $t_H = 2H/c$, где H – высота, т.е. кратчайшее расстояние от антенны ГБО до поверхности дна. В интервале времени $[t_H, T]$ вплоть до предельной наклонной дистанции $L_{n,max} = c \cdot T/2$ антенной последовательно принимаются эхо-сигналы обратного рассеяния от все более и более удаленных элементарных участков дна площадью $\Delta x \cdot \Delta y$, лежащих на озвучиваемых клиновидных полосках. После усиления, оцифровки и обработки (в АНПА после накопления) эхо-сигналы каждой полоски дна пиксель за пикселем отображаются на экране в виде строки раstra. Яркость каждого i -го пикселя пропорциональна мгновенной величине эхо-сигнала на антенне ГБО в момент времени t_i , которая, в свою очередь, пропорциональна силе интегрального отклика от всех рассеивателей, находящихся в пределах элементарного участка дна ($\Delta x_i \Delta y_i$). По мере озвучивания каждой последующей клиновидной полоски дна процесс повторяется. Эхо-сигналы каждого цикла зондирования записываются на своей отдельной (обычно горизонтальной) строке раstra. По мере поступательного перемещения носителя антенны ГБО в результате n циклов зондирования на n строках раstra формируется гидролокационное изображение поверхности морского дна в координатах «путевая дальность – наклонная траверзная дальность» (рис. 2). Вследствие прямоугольно-растрового отображения и вышеописанной

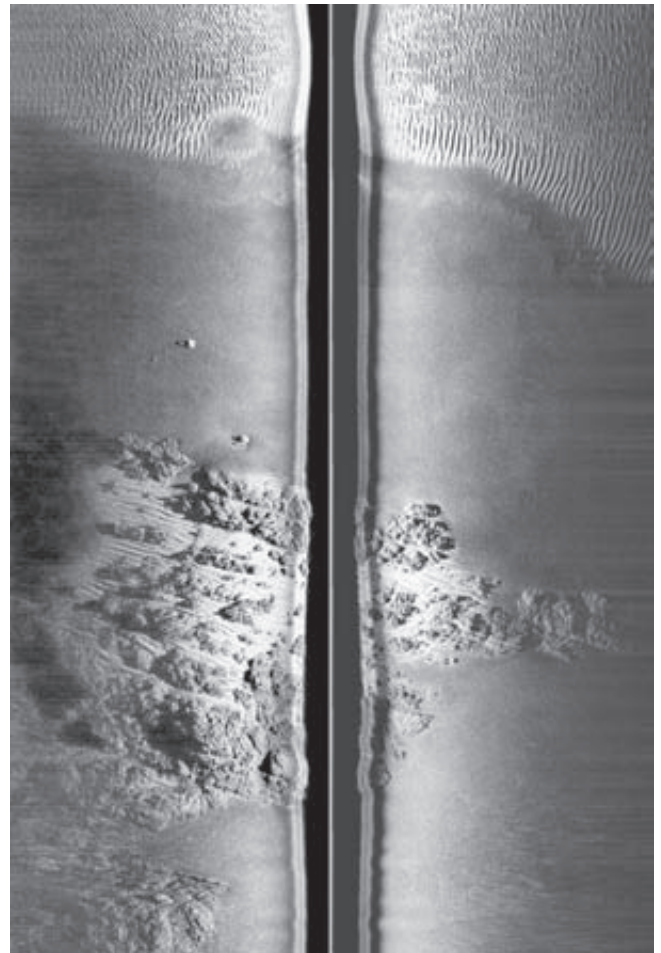


Рис. 2. Фрагмент эхограммы ГБО. Рабочая частота 430 кГц, полоса обзора 2х80 м

геометрии ГБО-обзора изображения предметов на эхограммах и теней от них близки к планшетным, что очень удобно для прямого визуального восприятия.

Поверхность дна на рис. 2 представлена тремя типами грунтов: верхняя часть эхограммы – песок в виде характерных дюн с расстоянием между гребнями от 0,5 до 1,5 м, тёмные участки внизу справа и посередине – осадочные породы (ил) с низким уровнем индикатрисы рассеяния, средняя и нижняя части слева – обнажения коренных пород. В левой части эхограммы на фоне илистого грунта представлено изображение искусственного объекта (затонувшей металлоконструкции размером 2,5х3х1,5 м).

Описанная схема обзора и отображения построена на следующих допущениях:

• сигналы ГБО распространяются в соответствии с законами геометрической акустики. Дифракционными и другими волновыми эффектами пренебрегаем;

• дно водоёма считается плоским и горизонтальным, неровности рельефа мелкомасштабны и их размер $\ll c \cdot T/2$;

• при отсутствии истинных батиметрических данных тенеграфический квазирельеф строится на основе вычисления локальных возвышений придонных объектов над окружающим фоном по формуле $h = H \cdot l_T / (l_T + r_0)$, где l_T – длина акустической тени от объекта, r_0 – расстояние от антенны ГБО до объекта, H – высота антенны над дном;

• размеры пикселей в строке раstra ГБО-изображения постоянны независимо от удаленности по горизонтали от нулевой линии, в то время как площадь

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2011. № 1(11) 43

обратного рассеивания элементарного участка дна $\Delta x \cdot \Delta y$ увеличивается с расширением волнового фронта. Как следствие ГБО-изображению свойственна существенная анизотропия: значения соседних пикселей по горизонтали (вдоль строки) практически не коррелированы, в то время как значения по столбцам (пиксели равной дальности) коррелированы сильно – тем сильнее, чем более они удалены от линии нуля;

- чувствительность приёмопередающей антенны ГБО считается постоянной и ненулевой по всем направлениям в пределах объёмного угла $\theta_r \times \theta_b$ веерообразной диаграммы направленности, но за пределами этого угла чувствительность считается нулевой. Данное допущение существенно упрощает анализ, а ошибки в оценке величины отклика заметны лишь для целей, расположенных на дне вертикально под антенной. При необходимости реальную неравномерность ДН антенны трудно учесть;

- область, отклики из которой формируют значение пикселя ГБО-изображения, соответствующего диапазону расстояний от антенны $[r, r + \Delta r]$, – это «плоская» фигура $\Delta x \cdot \Delta y$, являющаяся результатом пересечения разности двух сфер с радиусами r и $r + \Delta r$, объёмного четырёхгранного угла $\theta_r \times \theta_b$ и плоскости дна. Сигналы объёмного рассеяния от возможных объектов, взвешенных в толще воды в зоне пересечения разности сфер и объёмного угла, также могут дать заметный отклик. Но при отсутствии 3D-информации или иных дополнительных (например, теневых) признаков объектов зоне ГБО-обзора мы вынуждены включать вклад от этих объектов в интегральный отклик элементарного донного рассеивателя $\Delta x \cdot \Delta y$.

Получаемые с помощью ГБО акустические изображения дна

(эхোগраммы) по своей структуре являются тенеграфическими (светотеневыми) и весьма сходны с высотными аэрофотоснимками земной поверхности, сделанными при пологом солнечном освещении фотокамерой, направленной вертикально вниз. Совершенно разные виды съёмки дают столь похожие результаты не случайно. Сходство механизмов освещения и тенеобразования при малых углах скольжения в оптике и озвучивания с малых высот съёмки в гидролокации (в приближении геометрической акустики) пояснений не требует. Но при высотном фотографировании камера располагается в зенитном направлении снимаемой области, а при ГБО-обзоре облучающая и приёмная антенны представляют собой единое приёмопередающее устройство. Кажущееся несоответствие объясняется особенностями укладки сигналов на прямоугольный растр. В фотосистемах считывание информации с внутреннего раstra фотоматрицы осуществляется вне всякой связи с подсветкой, но при последовательном считывании пикселей фотоматрицы во взаимно-однозначное соответствие приводятся их адреса и координаты элементарных точек на фотографируемом поле. При ГБО-обзоре эквивалентом перебору адресов фотоматрицы является синхронизация аналого-цифровых отсчётов преобразуемого эхо-сигнала с их привязкой к моменту излучения зондирующей посылки. Кроме того, в оптике направление подсветки не совпадает с ориентацией строк в фотоматрице, в то время как направление строки раstra на ГБО-изображении строго привязано к направлению движения зондирующей посылки в пространстве.

Таким образом, для получения модели ГБО-изображения необходимо выполнять съёмку

в направлении строки раstra, имитируя процесс работы реального локатора. Сила отклика, который получит приёмник, зависит от многих факторов: от акустических свойств материала объекта, от его ориентации относительно падающего на него фронта акустической посылки, от расстояния до объекта, определяющего величину затухания звука в пространстве. Обстоятельством, усложняющим процесс генерации ГБО-изображения, является то, что значение каждого пикселя изображения определяется интегральным откликом от всех элементарных рассеивателей, расположенных на соответствующем пикселю расстоянии от антенны в пределах её ДН. Для воспроизведения этого процесса с использованием графического ускорителя можно поступить следующим образом.

1. Получить вспомогательное графическое изображение, поместив источник света и камеру в точку, в которой расположен ГБО. Изображение должно охватывать область, которую затрагивают акустические сигналы гидролокатора. При этом собирается информация об отражениях от всех объектов, расположенных в области действия прибора.

2. Про каждый пиксель изображения должна быть известна его глубина, которая определяется расстоянием до камеры от точки объекта, сформировавшего пиксель. При построении трёхмерных изображений графический ускоритель располагает такой информацией, поскольку вместе с изображением формируется буфер глубины (известный также как z-буфер). На самом деле имеется ряд препятствий для непосредственного использования буфера глубины, которые будут рассмотрены далее, но аналогичная информация всё равно может быть получена.

3. При известном расстоянии от каждого пикселя вспомогательного изображения до камеры появляется возможность вычислить, в значение какого элемента строки ГБО-изображения вносит вклад этот пиксель. Таким образом, результирующая строка вычисляется как взвешенная гистограмма буфера глубины изображения, в которой весом пикселя является его яркость на вспомогательном изображении.

При необходимости учёта неравномерности ДН антенны на вспомогательное изображение можно наложить корректирующий растр.

■ Алгоритм генерации модельных ГБО-изображений

При реализации алгоритма возникли некоторые трудности при использовании буфера глубины. Во-первых, многие графические ускорители не поддерживают получение буфера глубины в виде растра, пригодного для дальнейшей обработки: лишь немногие форматы буфера глубины допускают прямой доступ к данным, но с такими форматами алгоритмы построения трёхмерных изображений или просто отказываются работать, или работают некорректно. Во-вторых, буфер глубины содержит значения, являющиеся нелинейной функцией глубины, разрешение которых может существенно снижаться при приближении к дальней плоскости [4].

Альтернативой использованию буфера глубины является реализация шейдеров [5], т.е. программ, которые исполняются на графическом ускорителе. С использованием шейдеров для каждого пикселя могут быть вычислены и сила отклика (яркость), и его расстояние до источника сигнала,

при этом вычисленные величины могут быть закодированы в компонентах результирующего изображения. К сожалению, не удаётся представить таким образом ещё и процесс вычисления строки ГБО, но его удаётся максимально упростить.

Рассмотрим кратко принцип работы шейдеров. Код шейдера компилируется и загружается в графический ускоритель. Там шейдерные подпрограммы могут заменять собой некоторые этапы работы графического конвейера. Для графического ускорителя все отображаемые поверхности представляются как многогранники с треугольными гранями. При отображении треугольника необходимо пересчитать координаты его вершин в систему координат, связанную с камерой. На этом этапе работают подпрограммы, которые называются вершинными шейдерами. Вершинный шейдер должен как минимум пересчитать координаты вершины, но кроме того он может вычислить несколько текстурных координат, которые также будут связаны с результирующей вершиной. В роли текстурных координат могут выступать произвольные вектора небольшой размерности, например, собственно координаты вершины на текстуре или вектор нормали в точке. После пересчёта координат вершин определяются пиксели, которые будут составлять изображение треугольника. Для вычисления цветов этих пикселей могут использоваться пиксельные шейдеры. Пиксельный шейдер может получить доступ ко всем текстурным координатам, которые сформировал вершинный шейдер, при этом значения векторов текстурных координат линейно интерполируются в точку с координатами пикселя из вершин треугольника.

Поскольку у современного графического ускорителя мо-

жет работать одновременно несколько сотен ядер, каждое из которых специально предназначено для выполнения такого рода вычислений, генерация изображений с использованием шейдеров выполняется очень быстро. При использовании DirectX для генерации трёхмерных изображений код шейдеров может быть записан на высокоуровневом, C-подобном, не зависящем от конкретного графического ускорителя языке HLSL (High Level Shader Language) [4].

Для моделирования работы ГБО вершинный шейдер формирует следующие текстурные координаты:

- текстурные координаты точки;
- трёхмерный вектор, определяющий положение вершины относительно источника света (т.е. акустического излучателя) и камеры (т.е. приёмника);
- трёхмерный вектор, определяющий нормаль к поверхности в вершине.

Эти текстурные координаты используются пиксельным шейдером:

- с использованием текстурных координат определяется исходный цвет поверхности, который в данном случае обозначает отражающую способность по отношению к акустическому сигналу;
- вектор положения точки относительно источника света и нормаль к поверхности позволяют определить силу отражённого в данном направлении сигнала, которая в сочетании с отражающей способностью поверхности даёт силу отклика от данного пикселя. Эта величина кодируется в одной из цветовых компонент (в красной);
- длина вектора положения точки относительно источника света делится на максимальное расстояние действия ГБО, полученная величина кодируется в двух цветовых компонентах

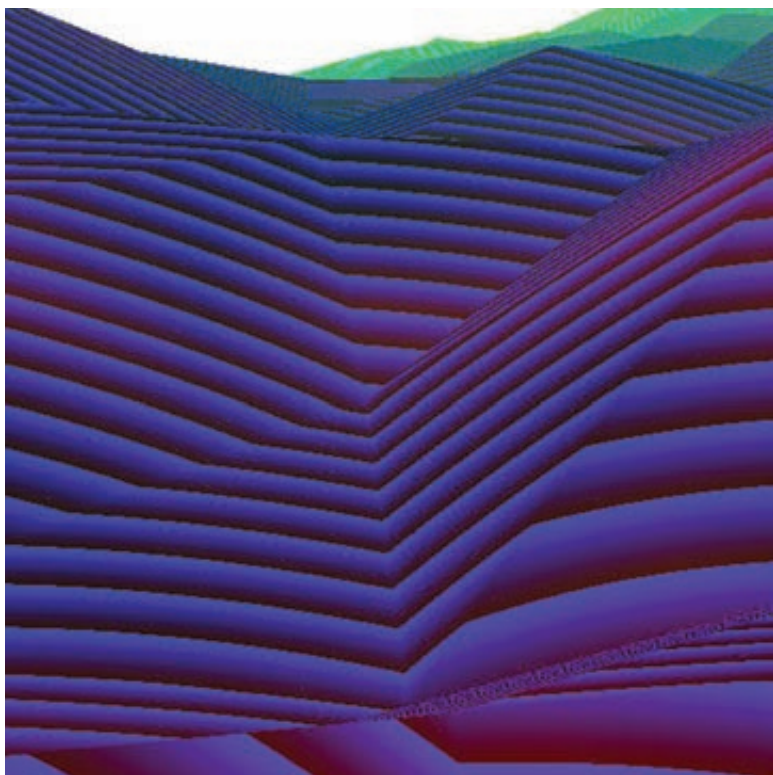


Рис. 3. Пример вспомогательного изображения. В красной компоненте цвета закодирована сила отклика, в зелёной – старший байт расстояния до точки, в синей – младший. Белые области не дали никакого отклика. Изображение сделано широким для целей отладки, на самом деле используются изображения с шириной около 40 пикселей

(зелёный цвет представляет старший байт, а синий – младший). Использование двух цветовых компонент для кодиро-

вания расстояния позволяет получать строки ГБО-растров с числом элементов с каждой из сторон аппарата более 256.

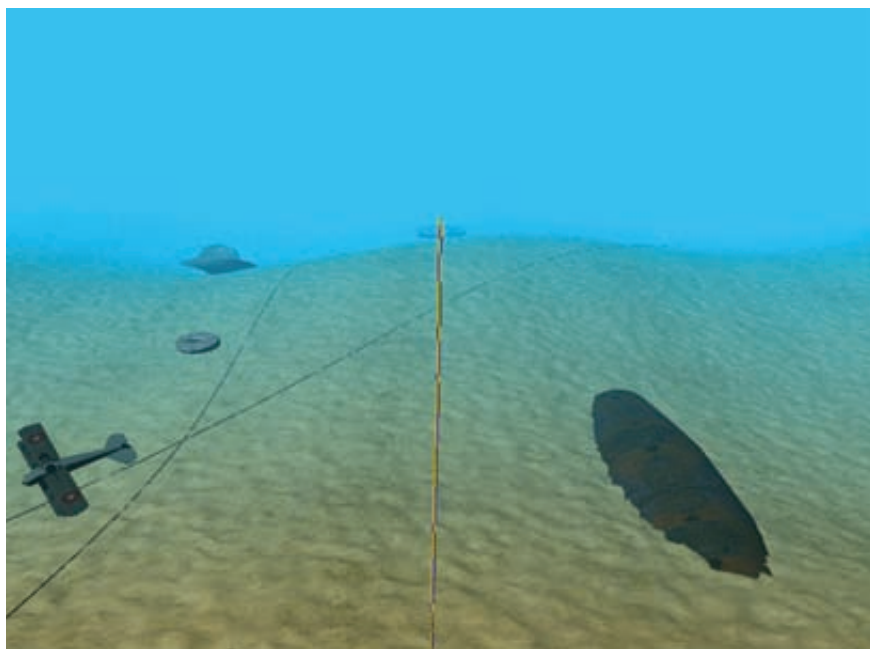


Рис. 4. Модель подводной среды, в которой выполнялась ГБО-съемка

Пример результирующего вспомогательного изображения показан на рис. 3.

Использование шейдеров позволяет в дальнейшем при необходимости более точно описать процесс генерации изображения, например, учесть ДН приёмопередающей антенны. Поскольку изображения для построения строки ГБО генерируются отдельным алгоритмом, в этом процессе можно использовать отдельные текстуры, описывающие акустические свойства поверхностей.

После получения вспомогательного изображения необходимо сформировать на его основе строку ГБО-изображения. Для этого требуется сгруппировать по расстоянию от источника сигнала информацию по пикселям вспомогательного изображения. В качестве групповой операции было использовано суммирование. Также тестировался вариант с использованием в этом качестве максимума, но такие изображения слабее походили на настоящие. Преимуществом группировки по максимуму является то, что при её использовании не возникает вопроса с нормированием полученного результата, поскольку значения остаются в диапазоне 0...255. При использовании суммы могут получаться величины, которые существенно выходят из этого диапазона. Возможно, стоит учесть ослабление сигнала в зависимости от пройденного расстояния, однако при этом сила отклика от дальних объектов заметно снизится. Поэтому в предположении, что аппаратура ГБО также выполняет компенсацию затухания сигнала с расстоянием, при формировании строк модельного ГБО-изображения по суммам значений использовалось просто деление значений сумм на постоянный коэффициент.

■ Вычислительный эксперимент

Для проведения вычислительного эксперимента была использована конфигурация модельной среды, представленная на рис. 4. В этой среде по ходу движения аппарата размещён ряд объектов различных размеров. Также по ходу движения аппарата и под углом к направлению движения проходят два кабеля, которые лежат на поверхности морского дна. Сам аппарат движется в направлении цели, обозначенной небольшой бочкой, которая видна на заднем плане. При этом направление движения аппарата может локально отклоняться от направления на цель, поскольку тактическое управление ориентировано на сохранение расстояния до морского дна с использованием информации, получаемой от эхолотов [6].

В результате было получено модельное ГБО-изображение, представленное на рис. 5. На модельном изображении видны образы объектов и их акустические тени, две белые прямые являются образами кабелей. Также заметен эффект смазывания деталей при удалении от аппарата, который проявляется и на настоящих изображениях.

При генерации модельных ГБО-изображений для аппарата, расположенного на небольшом расстоянии от поверхности морского дна, отчётливо проявляются все недостатки используемого представления подводного рельефа. Поскольку вспомогательные изображения строятся лучами, идущими вдоль поверхности, средства обеспечения впечатления гладкости для изображений объектов, представленных треугольными сетками (например, метод Фонга [7]), которые делают незаметными

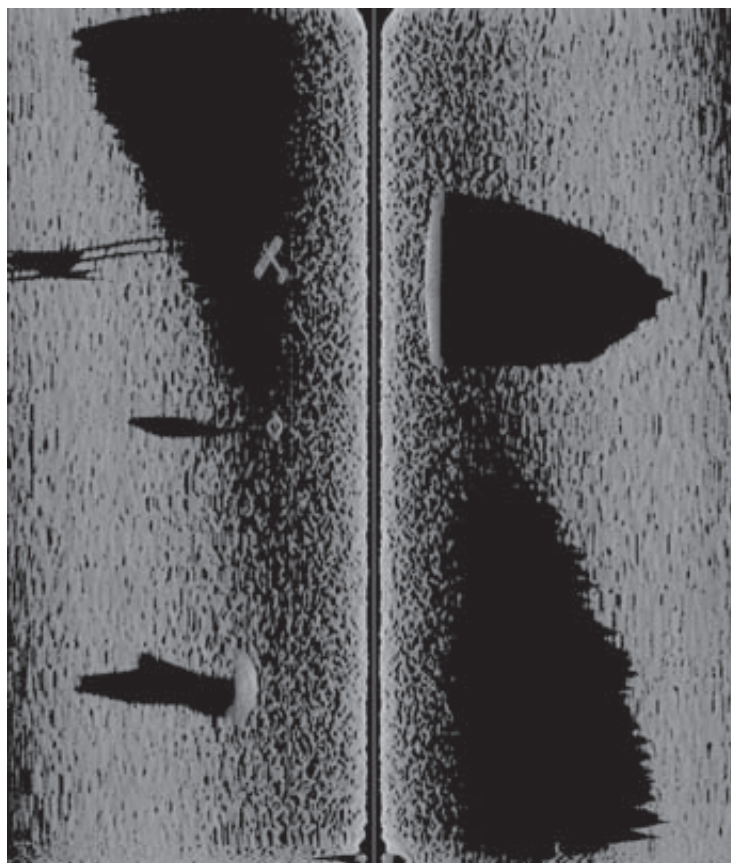


Рис. 5. Пример сгенерированного изображения

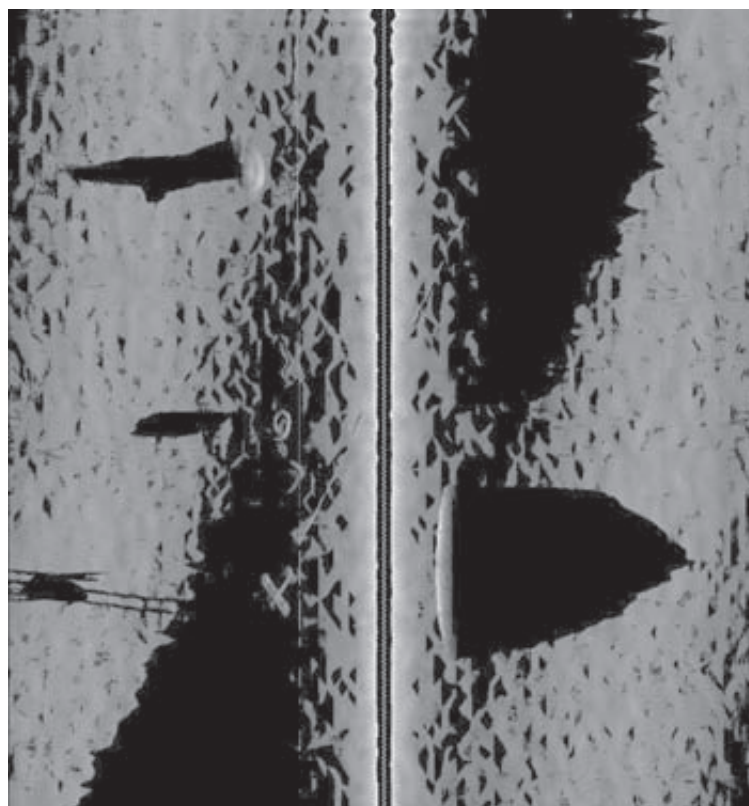


Рис. 6. Модельное ГБО-изображение, полученное при недостаточно детальном представлении рельефа: хорошо заметны треугольники, образующие поверхность

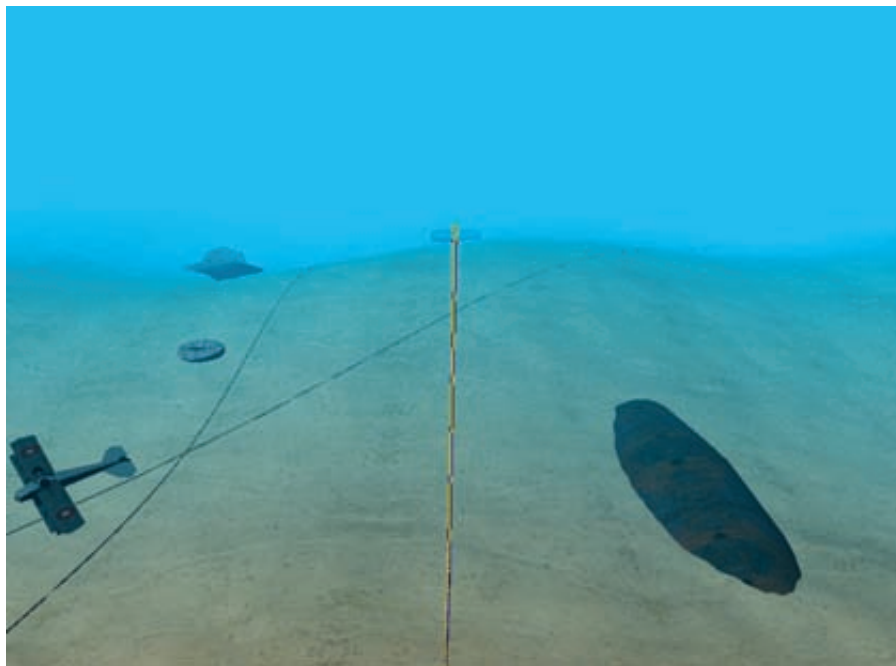


Рис. 7. Модель подводной среды, в которой выполнялась ГБО-съемка с недостаточно детальным представлением донной поверхности

переходы между соседними треугольниками поверхностей, не срабатывают, т.к. они не делают гладкими ломаные силуэты объектов.

На рис. 6 показано модельное ГБО-изображение, полученное для той же среды, которая использовалась при генерации изображения на рис. 5, но при менее детальном представлении рельефа. На этом изображении хорошо заметны треугольники, используемые для представления рельефа, что де-

лает его слишком нереалистичным. В то же время на рис. 7 представлено изображение, полученное при менее детальном рельефе, практически не отличающееся от того, которое представлено на рис. 4.

Таким образом, при использовании модели подводной среды для генерации модельных ГБО-изображений необходимо увеличивать точность представления рельефа. Для этих целей в дальнейшем предполагается использовать

алгоритмы, основанные на представлении рельефа текстурами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в работе алгоритм может быть использован для генерации модельных ГБО-изображений, которые представляют заранее известные конфигурации внешней среды со свойствами, необходимыми для тестирования конкретных особенностей алгоритмов обработки ГБО-изображений. Хотя получаемые модельные изображения не полностью воспроизводят особенности настоящих ГБО-изображений, они обладают достаточной степенью реалистичности для проверки основных аспектов работы таких алгоритмов. Использование шейдеров для генерации модельных изображений позволяет при необходимости существенно повысить точность алгоритмов, описывающих работу сенсоров.

В трёхмерной компьютерной графике разработаны технологии генерации очень реалистичных изображений, содержащих тени, отражающие поверхности, и т.д. Этот опыт может быть также использован в дальнейшем для повышения реалистичности генерируемых изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костоусов А.В., Костоусов В.Б. Моделирование гидролокатора бокового обзора с синтезированной апертурой // Подводные исследования и робототехника. 2008. №2/6. С.16–29
2. Бычков И.В., Максимкин Н.Н., Ульянов С.А., Хмельнов А.Е., Андреев П.Э. Представление информации о состоянии внешней среды в системе управления подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2008. №2/6. С. 49–57.
3. Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д. и др. Океанология: средства и методы океанологических исследований / Междунар. ассоц. акад. наук; РАН; Нац. акад. наук Украины. М.: Наука, 2005. 795 с.
4. Dunlop R. Using W-Buffers for Improved Depth Resolution. URL: http://www.mvps.org/directx/articles/using_w-buffers.htm.
5. MSDN Programming Guide for HLSL. URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb509635%28v=VS.85%29.aspx>.
6. Агеев М.Д., Киселёв Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. С. 398.
7. Phong B. T. Illumination for computer generated pictures // Communications of ACM. 1975. Vol. 18, № 6. P. 311–317.