

УДК 681.883:551.462.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ СРЕДСТВАМИ МАШИННОЙ ГРАФИКИ

**В.А. Бобков,
М.А. Морозов**

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт автоматизации и процессов
управления Дальневосточного отделения РАН¹

Разработан моделирующий комплекс, позволяющий получать искусственные гидролокационные изображения подводной обстановки для трехмерных сцен со сложным рельефом и объектами произвольной топологии. В моделирующем комплексе реализованы модели гидролокатора бокового обзора (ГБО) и эхолота. На примере ГБО-изображений рассмотрены нежелательные эффекты, возникающие при синтезе гидролокационных изображений, даются рекомендации по их минимизации. Возможность практического использования метода исследуется на примере обнаружения при помощи ГБО протяженных объектов (кабелей и трубопроводов) в условиях сложного рельефа и шумов. Сделаны оценки производительности системы моделирования.

//

Современная тенденция разработки и эксплуатации подводных робототехнических систем требует комплексного подхода. В частности, с точки зрения разработки программного обеспечения для АНПА необходимо не только разработать программное обеспечение (ПО) для бортовых компьютеров, но и обеспечить наличие тестирующего сервисного ПО, которое могло бы достаточно полно эмулировать работу аппарата «на стенде» и обеспечивать его диагностику. Это связано как с удобством обслуживания, так и с уменьшением риска потерять дорогостоящий аппарат из-за сбоев аппаратуры и ПО.

В настоящее время разработано множество программных комплексов, решающих различные задачи в сфере подводной робототехники. В работе

[1] описывается система моделирования подводной среды для тестирования автономных роботов. Эта среда использовалась для тестирования алгоритмов обхода препятствий и прослеживания протяженных объектов [2]. В среде реализована модель динамики реального подводного аппарата GARBI и 3D-картина подводной обстановки средствами OpenGL. Система визуализации рельефа дна и искусственных объектов описана в работе [3]. Визуализация осуществляется на основе реальных батиметрических замеров высокой точности. Обзор ряда других современных моделирующих комплексов АНПА можно найти в работе [4].

Создание моделирующих комплексов АНПА требует ре-

¹ 690041, Владивосток, ул. Радио, 5;
тел.: (423) 2313776

шения многих задач, и их работчики в зависимости от поставленных целей концентрируют свои усилия на актуальных для них аспектах, что в принципе затрудняет проведение сколько-нибудь полного и объективного сравнения достоинств и недостатков отдельных систем. В настоящее время разработаны и продолжают развиваться различные комплексы для визуального планирования миссий, диагностики и имитационной отладки функционирования систем АНПА.

Актуальной задачей в контексте создания моделирующего комплекса для подводных аппаратов является моделирование гидролокационных изображений, что необходимо для разработки и исследования методов распознавания подводных объектов и обхода препятствий. В работе [5] описан подход к моделированию гидролокационных изображений с использованием графических ускорителей. Авторы отмечают, что при помощи средств машинной графики возможно получить достаточно реалистичную картину подводной обстановки и использовать ее для отладки алгоритмов распознавания. К сожалению, авторы не приводят в своей работе достаточно сведений о параметрах моделируемых гидролокационных устройств, размерах и детальности сцены, не дают оценок производительности. Также упомянут ряд специфических трудностей, с которыми они столкнулись в процессе разработки и тестирования алгоритмов. В частности, затрагивается вопрос о точности представления рельефа триангуляционными сетками и его влиянии на возникновение нежелательного эффекта контрастных треугольников. Авторы упомина-

ют, что в перспективе их подход к моделированию рельефа может быть усовершенствован за счет использования текстур, и предлагают повысить степень реализма за счет использования шейдерных программ, учитывающих особенности отражения акустических волн.

Очевидно, что стендовые испытания не могут дать полной картины функционирования АНПА в реальной подводной миссии, но наша задача – максимально ликвидировать этот пробел. Современные аппараты, как правило, оснащены целым комплексом гидроакустического оборудования, служащим для ориентации, обхода препятствий и обследования дна. В то же время бортовые системы приобретают все большую степень интеллекта, и на них возлагается принятие решений по изменению траектории аппарата в зависимости от обнаруженных препятствий или «объектов интереса». Разумеется, при разработке таких алгоритмов управления АНПА этап тестирования весьма важен и требует дорогостоящих натуральных испытаний. Разработка виртуальной среды подводной обстановки и моделирование работы гидроакустических устройств может резко сократить количество таких испытаний.

В процессе моделирования подводной миссии АНПА действует в границах заданной сцены-полигона. Сценой служит некоторый участок водной среды, ограниченный рельефом дна и поверхностью воды. В моделирующем комплексе рельеф дна и другие элементы сцены задаются полигональными сетками, что позволяет формировать геометрические объекты любой топологической сложности: от простых неровностей до подводных пещер и нависаю-

щих карнизов. Также возможно размещать на подводных стенах модели затонувших судов, кабели, трубопроводы и прочие объекты искусственного происхождения. Мелкие детали задаются при помощи текстур, что позволяет получать сцены с высокой степенью реалистичности подводной обстановки.

Как правило, АНПА оснащены множеством гидролокационных устройств, таких как эхолокационные системы (ЭЛС), гидролокаторы бокового обзора (ГБО), гидролокаторы секторного обзора (ГСО). ЭЛС используются для обнаружения препятствий и движения на определенной высоте над дном. На аппаратах обычно монтируется несколько датчиков ЭЛС, каждый из которых наблюдает обстановку в своем секторе. ГБО, как это следует из названия, отслеживает обстановку с правого или левого борта и служит средством картирования местности и обнаружения объектов. ГСО также может использоваться для этих же целей, но кроме того служит более надежным средством обнаружения препятствий, возникающих по курсу аппарата.

Моделирование работы различных гидролокационных устройств средствами машинной графики проводится и в рамках создаваемого в ИПМТ имитационного моделирующего комплекса АНПА [4, 6]. Назначение этого комплекса – снижение количества дорогостоящих процедур натуральных испытаний АНПА для отработки алгоритмов навигации, управления, поиска и распознавания подводных объектов. В настоящей статье предлагается подход, в котором моделирование распространения и взаимодействия звуковой волны и среды осуществляется метода-

ми и средствами, принятыми для визуальных сцен. Разработанные в рамках моделирующего комплекса средства рендеринга позволяют использовать трехмерные данные в формате 3DS, что дает возможность применять широко распространенные 3D редакторы для построения сцен. Применяемая модель гидролокатора базируется на методологии геометрической акустики, и поэтому мы сознательно избегаем некоторых вопросов моделирования явлений дифракции и интерференции, связанных с волновой природой упругих колебаний. Так как геометрическая акустика является предельным случаем волновой акустики при стремлении длины звуковой волны к нулю, то для нее в основном применимы те же законы, что и в геометрической оптике. Такое упрощение имеет определенные преимущества, так как позволяет нам применять методы и программное обеспечение машинной графики для формирования гидролокационных картин подводной обстановки. Использование вычислительных ресурсов современных видеокарт позволяет одновременно моделировать движение аппарата и работу гидролокатора практически в реальном времени.

■ Модель излучателя и приемника

Для моделирования излучателя и приемника однолучевого гидролокатора используется идеальная камера, совмещенная с источником света. Источник света помещается в фокус камеры и направляется вдоль ее оптической оси (рис. 1). Внешние параметры камеры OpenGL устанавливаются таким образом, чтобы ее положение и направление соответствовали

месту бортового излучателя в мировой системе координат. Внутренние параметры камеры формируют необходимую диаграмму направленности излучателя и задают характеристики виртуального «сенсора» сигнала. Разрешение камеры устанавливается из соображений качества принимаемого сигнала. Далее происходит рендеринг всей подводной среды. Таким образом, сцена освещается источником, и все видимые полигоны сцены получают засветку «акустическим сигналом».

Для моделирования распространения сигнала была выбрана простейшая модель освещения – чисто диффузное освещение. В этой модели считается что излучение, падающее в точку, одинаково рассеивается по всем направлениям полупространства. Таким образом, освещенность в точке определяется только плотностью излучения в точке поверхности, а она линейно зависит от косинуса угла падения.

$$I = \max(0, \vec{n} \times \vec{l}),$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности, \vec{l} – направление на источник.

В графических ускорителях реализована схема освещения по Фонгу, поэтому освещенность каждого пиксела говорит

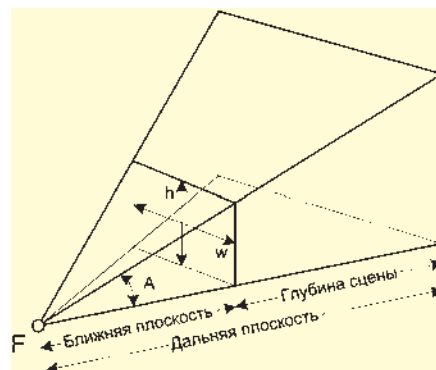


Рис. 1. Модель идеальной камеры

о наклоне площадки по отношению к лучу распространения звукового сигнала. Иными словами, в каждой точке может быть получен косинус падения звукового луча на поверхность.

Для расчета эхо-откликов от отдельных элементов сцены, находящихся на различном удалении от гидролокатора, используется буфер глубины видеокарты. Этапы процесса формирования строки откликов на импульс гидролокатора можно увидеть на рис. 2, 3. На рис. 2, а показан фрагмент подводной обстановки тестового полигона: рельеф морского дна и затонувшая подводная лодка. Там же схематически показана апертура идеального гидролокатора. Так как реальная апертура составляет 0,5–1° по горизонтали, то для иллюстративных целей горизонтальный угол раскрытия намеренно увеличен до 10°,

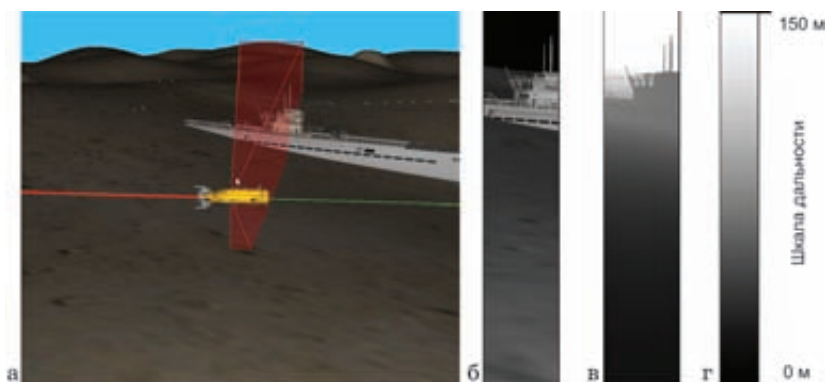


Рис. 2. Формирование отклика гидролокатора: а – общий вид сцены и апертура ИГЛ, б – интенсивность отраженного сигнала, в – буфер глубины, г – шкала дальности для буфера глубины

чтобы более подробно передать детали изображения. Рис. 2, б – это изображение интенсивности откликов, сформированное видеокарты, рис. 2, в – изображение буфера глубины, приведенного к линейной шкале (рис. 2, г). Нетрудно заметить, что на изображении буфера глубины легко различимы только те предметы, которые имеют рельеф или геометрически выделяются на общем фоне.

С учетом уровней сигнала на заданных заранее интервалах расстояния рассчитывается значение мощности отраженного сигнала. Далее по набору откликов методами линейной интерполяции на интервале значений строится непрерывная функция мощности получаемого модельного сигнала.

Предусмотрено разделение объектов с точки зрения отражения и поглощения звука – достаточно задать величину коэффициента K_d диффузионного отражения материала и таким образом отрегулировать его поглощающие свойства.

■ Моделирование гидролокатора бокового обзора

Камера жестко закреплена на борту модели подводного робота и направлена строго влево или вправо по азимуту и под углом к горизонту таким образом, чтобы обеспечить максимально возможный обзор донного рельефа. Движение АНПА проходит по траектории, рассчитанной на основе модели миссии со всеми особенностями реальной динамики и управления АНПА. Таким образом, последовательность положений и ракурсов камеры максимально приближена к реальным наблюдениям при движении аппарата.

Параметры камеры задаются таким образом, чтобы соот-

ветствовать диаграмме направленности излучателя гидролокатора: его луч имеет широкий угол по вертикали и узкий по горизонтали. Используется камера с вертикальным углом 45 градусов и горизонтальным 0,6 градуса. В качестве сенсора гидролокатора используются окна размером 100×8000 или 200×16000 пикселей. Размеры сенсора влияют на чувствительность и угловое разрешение гидролокатора. Окна таких больших размеров затруднительно получить на большинстве современных мониторов, поэтому применяется техника внеэкранных рендеринга во фрейм-буфер видеокарты. По результатам рендеринга формируется строка сигналов-откликов гидролокатора с использованием значений интенсивности в буфере цвета и глубины в z-буфере (рис. 3). По мере движения аппарата по заданной траектории над рельефом дна формируется гидролокационная картина, обычно наблюдаемая с борта АНПА посредством ГБО. На рис. 4 показан процесс движения аппарата по тестовому полигону, на котором присутствуют рельеф, затопленная подводная лодка и лежащий на дне кабель диаметром 5 см. На гидролокационном изображении видны отдельные детали корпуса и акустическая тень от лодки и достаточно хорошо различим тонкий кабель, находящийся на расстоянии свыше 100 м от излучателя.

Строка откликов S_k получается суммированием интенсивности пикселей (I_{xy}), попадающих в соответствующий диапазон расстояний (d) от источника:

$$S_k = \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^h I_{xy} \{d_{k-1} \leq d_{xy} < d_k\},$$

где $k = 1, \dots, n$.

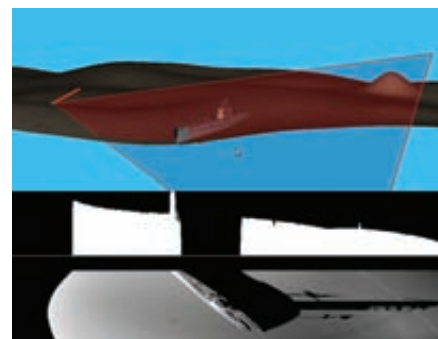


Рис. 3. Моделирование отклика гидролокатора. Положение аппарата на сцене и апертура излучения ГБО (вверху), отдельная строка откликов ГБО (в середине), полученное из совокупности накопленных откликов гидролокационное изображение (внизу)

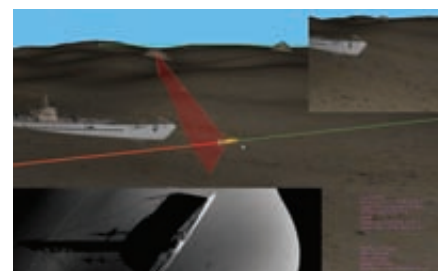


Рис. 4. Движение АНПА над рельефом дна. Показаны диаграмма направленности излучателя ГБО, накопленное изображение ГБО (внизу слева) и вид с бортовой камеры в направлении работы ГБО (вверху справа). Красная линия обозначает пройденный путь, зеленая – планируемую траекторию

■ Нежелательные эффекты, возникающие при моделировании сигнала гидролокатора

При моделировании гидролокатора мы столкнулись со следующими нежелательными эффектами, искажающими картину подводной обстановки. Во-первых, это эффект контрастных треугольников, наличие которого также отмечено в работе [5], во-вторых, эффект муара. Эффект муара возникает при сочетании острых углов обзора рельефа и недостаточного углового разрешения камеры, моделирующей излучатель.

На рис. 5 собраны иллюстрации нежелательных эффектов, возникающих при моделирова-

нии ГБО. Параметры моделирования следующие: высота над дном 7–8 м, угол раскрыва излучателя 45°, угол к горизонту -20°. На рис. 5, б, г представлен более точный рельеф с регулярным размером ячейки 2 м, а рис. 5, а, в сделаны на сцене с более грубой сеткой треугольников, которая получена оптимизацией первой средствами 3DMax. Рис. 5, а иллюстрирует возникновение эффекта муара при слабом угловом разрешении (использовалась матрица сенсора 20×1000) и эффект контрастных треугольников на грубом рельефе. Рис. 5, б показывает, что при уменьшении размера треугольников рельефа до 2 м эффект контрастных треугольников уменьшается, но полностью не исчезает, и муар по-прежнему присутствует. На рис. 5, в использовался сенсор 320×16000, что позволило практически избавиться от эффекта муара за счет увеличения углового разрешения, треугольники по-прежнему

видны. И, наконец, на рис. 5, г при помощи сенсора 320×16000 можно наблюдать качественную картинку на точном рельефе. В рассмотренных примерах использовалась «гладкая» поверхность дна, на которой отраженный сигнал формируется за счет свойств материала сцены. Применение текстур, имитирующих донный ландшафт, позволяет добиться еще более высокой степени реализма и практически полностью замаскировать контрастные треугольники (см. рис. 3, 4). Еще один аспект получения реалистичной гидролокационной картины связан с моделированием акустических шумов.

■ Моделирование зашумленного сигнала

Реальные гидролокационные изображения, как правило, содержат некоторое количество шумов, и их качество отличается от модельных изображений в худшую сторону. Шумы обусловлены следующими факторами: фоновым шумом среды, погрешностью измерительной

аппаратуры, множественными отражениями от окружающих предметов. Поэтому для повышения реализма синтезированных гидролокационных изображений мы добавили в процедуру их получения шум. Так как вычисление уровня эхо-сигнала является нетривиальной задачей, то мы ограничимся упрощенной моделью, где будут присутствовать только фоновый шум и ошибки измерения:

$$\begin{cases} S'_k = S_k N(1, \sigma_{signal}) + S_{max} N(0, \sigma_{env}) \\ S'_k = \max(S'_k, 0) \end{cases}$$

где $N(\mu, \sigma)$ – нормальное распределение, σ_{signal} – СКО сигнала, σ_{env} – СКО фоновых шумов, S_{max} – максимальный возможный сигнал.

Используя OpenGL-окно с размерами $w \times h$, мы получаем $S_{max} = w \times h$, так как максимальное значение уровня в отдельном пикселе равно 1.

В результате применения этой модели к сигналу ГБО с параметрами шума $\sigma_{signal}=1$ и $\sigma_{env}=1,0E-5$ мы получаем следующую картину (рис. 6).

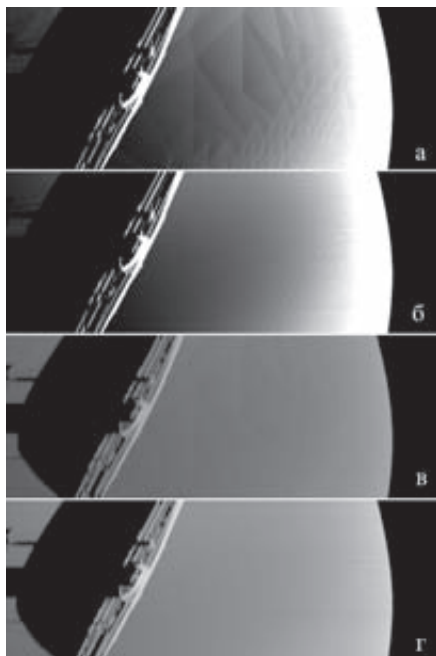


Рис. 5. Нежелательные визуальные эффекты при моделировании ГБО: а, б – муар и контрастные треугольники; в – только контрастные треугольники; г – без нежелательных эффектов

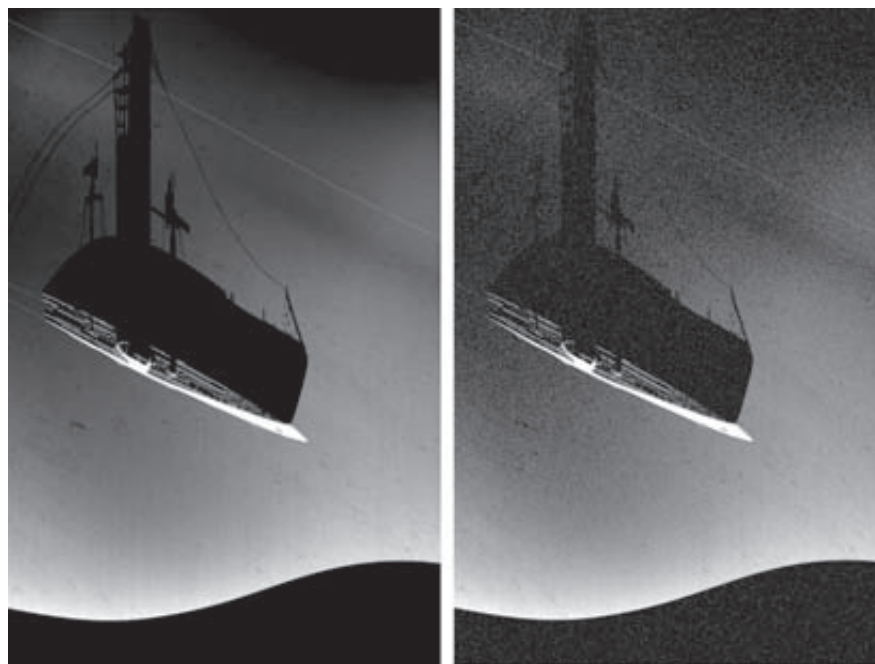


Рис. 6. Синтезированное изображение ГБО без шума (слева) и с добавлением шума (справа)

В левой части изображения ясно видна гидролокационная тень, повторяющая форму элементов надстройки подводной лодки, также виден отклик от кабеля диаметром 5 см. Кабель наполовину погружен в грунт и находится на удалении 100–150 м. На зашумленном изображении (справа) видно, что мелкие детали надстройки и тень от них утрачивают четкость, хотя по-прежнему различимы. Местоположение кабеля также вполне обнаруживается визуально. В правой части изображения видны также фоновые шумы, их можно заметить на фоне мертвой зоны ГБО (темная полоса внизу).

■ Результаты измерений и выводы

Замеры производительности показали, что для использованной сцены (рис. 2–4), содержащей 777 000 треугольников, быстродействие моделирования приближается к скорости моделирования в реальном времени. Замеры, произведенные на различном оборудовании, сведены в таблицу.

Эти результаты получены при моделировании миссии АНПА, заключающейся в движении по запланированной траектории. При этом рассчитывались реальная траектория согласно модели динамики, работа ГБО на оба борта, работа пяти эхолотов и бортовой видеокамеры с разрешением 320×240, а также визуализации

общего вида сцены. Таким образом, можно утверждать, что при использовании современных программных и аппаратных средств машинной графики можно моделировать работу автономных подводных аппаратов с широким набором гидроакустического оборудования практически в реальном времени и со степенью реализма, позволяющей проводить отладку средств навигации, поиска и распознавания объектов.

В перспективе развитие гидролокационной части моделирующего комплекса будет идти по нескольким направлениям. Во-первых, необходимо исследовать возможность использования еще более детального рельефа, содержащего неровности, характерные для морского дна. Повышение детализации рельефа предполагается достичь за счет динамического разбиения и модификации исходной триангуляционной сетки при помощи информации, задаваемой «рельефными» текстурами. Во-вторых, для совершенствования возможностей по тестированию алгоритмов распознавания протяженных объектов необходимо рассмотреть случай скрытого залегания трубопровода или кабеля, т.е. случай полного или частичного их погружения в грунт (песок, ил и т.п.). Для этого потребуются моделирование распространения и отражения эхо-сигнала в «многослойной» среде с разными коэффициентами затухания и отражения.

Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН: №12-III-A-03-039, №12-I-П15-05.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antich J., Ortiz A. An Underwater Simulation Environment for Testing Autonomous Robot Control Architectures // Proc. of the IFAC conference on Control. Applications in Marine Systems. 2004, 7–9 July. Ancona, Italy. P. 509–514.
2. Antich J., Ortiz A., Oliver G. A PFM-based control architecture for a visually guided underwater cable tracker to achieve navigation in troublesome scenarios // Journ. of Maritime Research. 2005. Vol. 2, No. 1. P. 33–50.
3. Chapman P., Stevens P., Wills D., Brookes G. Visualizing Underwater Environments Using Multifrequency Sonar // Journ. IEEE Computer Graphics and Applications. 1999. Vol. 19. Issue 5.
4. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Медведев А.В., Павин А.М., Севрюк А.В., Сенин Р.А., Бобков В.А., Борисов Ю.С., Мельман С.В. Имитационный моделирующий комплекс для «интеллектуального» автономного подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. №2. С. 46–52.
5. Хмельнов А.В., Золотарев В.В. Моделирование гидролокационных изображений с использованием графических ускорителей // Подводные исследования и робототехника. 2011. №1. С. 41–48.
6. Бобков В.А., Борисов Ю.С., Инзарцев А.В., Мельман С.В. Моделирующий программный комплекс для исследования методов управления движением автономного подводного аппарата // Программирование. 2008. Т. 34, №5. С. 257–266.

Результаты замеров производительности

Оборудование	Размеры сенсора ГБО (W/H)	Время модели, с	Затраченное время, с
Intel i5-760 @ 2,8 ГГц NVIDIA GTX-470	100'8000	100	128
Intel i5-760 @ 2,8 ГГц NVIDIA GTX-470	200'16000	100	263
Intel E4400 @ 2,4 ГГц NVIDIA 8600 GT	100'8000	100	210

