

К. Ф. Лысаков^{1,2}, **К. К. Облаухов**¹, **М. Ю. Шадрин**^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

²Институт автоматизации и электрометрии СО РАН
пр. Академика Коптюга, 1, Новосибирск, 630090, Россия

lysakov@ngs.ru, obko@mail.ru, mikesha@sl.iae.nsk.su

ПРИМЕНЕНИЕ FPGA ДЛЯ УСКОРЕНИЯ РАСЧЕТА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЦУНАМИ *

Рассматривается вопрос ускорения численного расчёта распространения волны цунами от очага до берега в рамках дифференциальной модели мелкой воды с применением аппаратного ускорения на базе FPGA. Разработана программная архитектура для расчета системы мелкой воды без учёта внешних сил, являющейся эквивалентной используемой в пакете MOST для численного моделирования движения волны цунами по водной акватории.

Численная реализация системы мелкой воды осуществлялась по схеме Мак-Кормака. Точность вычислений разработанного решателя была проверена сравнением с точным решением, известным в случае плоского наклонного дна. Достигнутая точность не уступает, а местами и превосходит точность известного программного пакета MOST.

Ключевые слова: расчет цунами, ускорение, FPGA, Мак-Кормака, MOST, численные модели.

Введение

Возможность оценки опасности побережий в случае возникновения цунами до прихода туда волны является востребованной и актуальной задачей для прибрежных регионов, находящихся в зоне риска. Основная проблема служб предупреждения цунами – это своевременное оповещение населения и реализация различных эвакуационных сценариев (в зависимости от ожидаемой высоты волны) в тех местах побережья, где это требуется [1; 2]. Работа направлена на ускорение численного расчёта распространения волны цунами от очага до берега в рамках дифференциальной модели мелкой воды с применением аппаратного ускорения на базе FPGA.

Широко известен и применяется подход на основе численного моделирования распространения волны с использованием дифференциальной модели мелкой воды. Наибольшее распространение получили несколько разностных схем, корректно решающих нелинейные уравнения мелкой воды, реализованные в виде алгоритмов пакеты прикладного программного обеспечения MOST, TUNAMI и COMCOT. Численный расчёт распространения волны на персональном компьютере в достаточной области (порядка 10 миллионов расчётных узлов)

* Работа выполнена в рамках бюджетного проекта 0319-2018-0010 «Исследование и развитие методов и технологий построения интегрированных программно-аппаратных комплексов для задач моделирования и управления динамическими системами обработки и отображения данных» (регистрационный номер: АААА-А17-117062110016-4).

длиться 2–3 часа [3]¹. При этом пространственные шаги сетки, покрывающей область такого размера, в которую входят и очаговая область, и береговая линия, не может быть достаточно детальной для корректного моделирования вблизи берега и в бухтах. При использовании в расчётах шага, равного нескольким метрам (вместо нескольких сот метров), потребуется на 2–3 порядка больше вычислительных ресурсов (оперативной памяти и времени расчётов), что практически исключает использование персональных компьютеров для получения результата в течение имеющихся в запасе десятков минут.

Математическая модели и расчетная схема

В пакете MOST для численного моделирования движения волны цунами по водной акватории используется следующий эквивалентный вид так называемой системы мелкой воды без учёта внешних сил (донное трение, сила Кориолиса и т. д.) [4]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} &= 0\end{aligned}$$

где $H(x, y, t) = \eta(x, y, t) + D(x, y)$ – полная глубина слоя жидкости, $\eta(x, y, t)$ – глубина возмущенного слоя, $D(x, y)$ – профиль глубин, считающийся известным (цифровая батиметрия), t – время, $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ – компоненты вектора скорости вдоль осей x и y соответственно, g – ускорение свободного падения.

Моделирование происходит в прямоугольной и не меняющейся со временем области, с применением разностных схем прямоугольной сетке, где $\Delta x = x_{i+1} - x_i$, $\Delta y = y_{j+1} - y_j$ – шаги сетки по пространственным переменным x и y , $\tau^n = t^{n+1} - t^n$ – шаг по времени. В данной работе для простоты используется равномерный шаг как по пространственным переменным, так и по времени.

Для аппроксимации уравнений мелкой воды используется явная двух шаговая конечно-разностная схема второго порядка аппроксимации типа Мак-Кормака [5; 6].

1 шаг:

$$\begin{aligned}\frac{\hat{H}_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n}{\tau} + \frac{H_{ij}^n u_{ij}^n - H_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta x} + \frac{H_{ij}^n v_{ij}^n - H_{i-1j}^n v_{i-1j}^n}{\Delta y} &= 0 \\ \frac{\hat{u}_{ij}^{n+1} - u_{ij}^n}{\tau} + u_{ij}^n \frac{u_{ij}^n - u_{i-1j}^n}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{u_{ij}^n - u_{i-1j}^n}{\Delta y} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta x} &= 0 \\ \frac{\hat{v}_{ij}^{n+1} - v_{ij}^n}{\tau} + u_{ij}^n \frac{v_{ij}^n - v_{i-1j}^n}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{v_{ij}^n - v_{i-1j}^n}{\Delta y} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta y} &= 0\end{aligned}$$

2 шаг:

$$\begin{aligned}\frac{H_{ij}^{n+1} - (\hat{H}_{ij}^{n+1} + H_{ij}^n)/2}{\tau/2} + \frac{\hat{H}_{i+1j}^{n+1} \hat{u}_{i+1j}^{n+1} - \hat{H}_{ij}^{n+1} \hat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\hat{H}_{ij+1}^{n+1} \hat{v}_{ij+1}^{n+1} - \hat{H}_{ij}^{n+1} \hat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} &= 0 \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - (\hat{u}_{ij}^{n+1} + u_{ij}^n)/2}{\tau/2} + u_{ij}^n \frac{\hat{u}_{i+1j}^{n+1} - \hat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{\hat{u}_{ij+1}^{n+1} - \hat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} + g \frac{\hat{\eta}_{i+1j}^{n+1} - \hat{\eta}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} &= 0 \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - (\hat{v}_{ij}^{n+1} + v_{ij}^n)/2}{\tau/2} + u_{ij}^n \frac{\hat{v}_{i+1j}^{n+1} - \hat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{\hat{v}_{ij+1}^{n+1} - \hat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} + g \frac{\hat{\eta}_{ij+1}^{n+1} - \hat{\eta}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} &= 0\end{aligned}$$

¹ См. также: TSUNAMI Samoa, 29 September, 2009. URL: https://www.preventionweb.net/files/27077_tsunami_publication2wfbblanks.pdf

Реализация алгоритмов на FPGA

Вентильные матрицы, программируемые пользователем (FPGA) для различных задач, используются с 1990-х гг. При этом вначале наибольшее применение нашли вариации программируемых логических матриц (PLD/CPLD), имеющие энергонезависимую память для хранения конфигурации. PLD успешно применялись для решения небольших задач по разработке автономных устройств и контроллеров, имеющих малое энергопотребление и массгабаритные размеры. Увеличение объема логических элементов и возможность неограниченного перепрограммирования для изменения алгоритмов обработки данных стало возможным при появлении FPGA. Такие FPGA позволяют реализовывать трудоемкие математические алгоритмы обработки данных, а также выполнять прототипирование вычислительных устройств для дальнейшего производства серийных заказных микросхем ASIC. Но до недавнего времени существовало 2 основных препятствия для применения FPGA, связанных с необходимостью ручной реализации алгоритмов с точностью до регистров и триггеров – уровень регистровых передач RTL (register transfer level):

- 1) трудоемкость реализации программных модулей, требующая значительно больше времени (до 2 порядков больше, чем реализация для PC на высокоуровневых языках);
- 2) высокие требования к квалификации разработчика.

Создаваемые средства для автоматизации процесса разработки (Simulink MatLab, SystemVerilog, SystemC) не позволяли производить полноценную разработку алгоритмов на высокоуровневом языке: происходило значительное снижение производительности и требования к ресурсам по сравнению с RTL моделью.

Современная технология High-Level Synthesis (HLS) позволяет использовать для описания цифровых схем C-подобный язык [7]. Это является новым витком развития способов создания различных вычислительных устройств, обеспечивающих полный цикл: от описания архитектуры до верификации проекта с использованием различных средств моделирования. HLS представляет собой автоматизированный процесс проектирования, который интерпретирует алгоритмическое описание поведенческой модели и позволяет создавать цифровые устройства, четко реализующие заданные условия. С помощью HLS можно легко изменять параметры конвейера, подстраиваясь под временные (timing) или пространственные (utilization) требования. Также технология HLS позволяет производить верификацию программного кода до его преобразования в схему для конкретной микросхемы FPGA. Именно технология HLS и большие ресурсы современных микросхем FPGA позволяют сегодня применять их для решения новых типов задач в новых областях.

Архитектура вычислителя

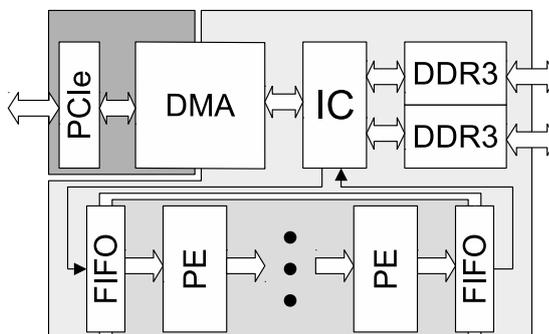
Изложенная вычислительная схема была реализована на платформе вентильных матриц программируемых пользователем FPGA.

Для реализации алгоритма на FPGA была предложена архитектура поточного вычислителя, состоящая из процессорных элементов (ПЭ). ПЭ осуществляет вариант двумерной прогонки – конвейера с последовательным потоком данных. Вспомогательными данными для каждого узла, которые необходимо хранить, являются значения всех используемых функций в 4-х соседних узлах. Особенность архитектуры FPGA позволяет использовать внутреннюю память (BRAM) для организации соответствующего буфера данных и линии задержки, что позволяет реализовать конвейер при количестве памяти до $2N_x$.

Математические операции, необходимые для алгоритма Мак-Кормака, реализованы вычислительным конвейером, обеспечивающим производительность обработки одной точки сетки за один такт. Полученное решение позволяет гарантировать производительность с точностью до такта.

Блок-схема предложенной архитектура всего спецпроцессора представлена на рисунке (см. далее). Помимо самого вычислителя, спецпроцессор имеет контроллеры памяти DDR3, контроллер PCIe, модуль DMA, обеспечивающий взаимодействие вычислителя с памятью компьютера-хоста в режиме прямого доступа. Данные поступают в вычислитель из памяти через FIFO, что позволяет легко варьировать частоту отдельных вычислительных блоков,

подстраиваясь под конкретный кристалл FPGA и характеристики внешней памяти и интерфейсов. Сам вычислитель в зависимости от доступных ресурсов FPGA состоит из одного или нескольких процессорных элементов.



Архитектура спецпроцессора

Спроектированный вычислитель на уровне алгоритмов был протестирован с применением технологий HLS. Модули, обеспечивающие работу всего процессора, протестированы с помощью RTL-симуляторов.

Для практической реализации и тестирования были использованы следующие платформы:

- SLEDv7 на базе кристалла семейства Virtex-6 [8];
- VC709 на базе кристалла Virtex-7².

Итоговая производительность и затраты ресурсов зависят не только от количества ПЭ, но также от частоты их работы. В результате тестирования было выяснено, что реализованные конвейеры способны работать на частоте 200 МГц на плате SLEDv7 и до 300 МГц на платах VC709 и KU115.

Далее в таблице представлена производительность вычислителя для двух платформ. Замеры представлены для тестовых данных, используемых NOAA (2580 × 2879 точек, акватория Тихого океана) с временным шагом 10 с. В случае платы SLEDv7 использовалась цепочка из 2 ПЭ одинарной точности на частоте 200 МГц. В результате была получена производительность в 52 итерации в секунду, или час модельного времени за 6,84 с.

Сравнение производительности вычислителей при использовании разных кристаллов

| | xc6vsx315-1 (SLEDv7) | xc7vx690-2 (VC709) |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Кол-во ПЭ | 2 | 8 |
| Частота (МГц) | 200 | 250 |
| Время одного прохода (мс) | 38 | 31 |
| Время одной итерации (мс) | 19 | 3,8 |

Платформа VC709 позволила разместить в себе 8 процессорных элементов на частоте 250 МГц. Итоговая производительность составила 263 итерации в секунду, или час модельного времени за 1,368 с.

² Xilinx Inc (2016), "Xilinx Virtex-7 FPGA VC709 Connectivity Kit". URL: <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/dk-v7-vc709-g.html>

Тестирование предлагаемого решения

Для тестирования описанного численного метода и его реализации было проведено сравнение результатов численного решения модельной задачи распространения цунами от круглого источника над наклонным дном с известным точным решением, а также с решением, полученным пакетом MOST [5]. Сравнение распределения высот и времен прихода волны показало хорошее их соответствие вне зоны шельфа, т. е. там, где глубина превышает 150–200 м.

Заключение

В целях ускорения расчета распространения волны цунами по глубоководной части океана был спроектирован спецвычислитель на базе архитектуры вентиляльных матриц программируемых пользователем (FPGA). Численная реализация системы мелкой воды осуществлялась по схеме Мак-Кормака. Точность вычислений разработанного решателя была проверена сравнением с точным решением, известным в случае плоского наклонного дна. Достигнутая точность не уступает, а местами и превосходит точность известного программного пакета MOST.

Предложенная архитектура поточного вычислителя на базе FPGA основана на процессорных элементах (ПЭ) для двумерной прогонки (конвейера с последовательным потоком данных), что позволяет масштабировать решение для различных кристаллов, получая максимально возможную производительность. Архитектура предложенного ПЭ позволяет одновременно обрабатывать N точек входного потока данных, что дает возможность параметризовать ПЭ в зависимости от особенностей используемой вычислительной платформы для получения максимальной производительности.

Список литературы / References

1. Titov V. V., Gonzalez F. I. Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model // NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112. 1997.
2. Titov V., Gonzalez F., Bezhaev A. Yu., Lavrentiev M. M., Marchuk A. G., Avdeev A. V. Real-Time Tsunami Forecasting: Challenges and Solutions // Proc. of the International Conference "Mathematical Methods in Geophysics". Novosibirsk, 2003. P. 225–228.
3. Gica E., Spillane M., Titov V., Chamberlin C., Newman J. Development of the forecast propagation database for NOAA's short-term inundation forecast for tsunamis (SIFT) // NOAA Technical Memorandum. 2008. URL: <https://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>
4. Marchuk A. G. Estimating Tsunami Wave Height over a Sloping Bottom in the Ray Approximation // Numerical Analysis and Applications. 2015. Vol. 8 (4). P. 304–313.
5. Lavrentiev M. M., Romanenko A. A., Lysakov K. F. Modern Computer Architecture to Speed-Up Calculation of Tsunami Wave Propagation // Proc. of the Eleventh (2014) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. 2014. P. 186–191.
6. Lavrentiev M. M., Romanenko A. A. Modern software architectures facilities to accelerate calculations // Proc. of the XII International workshop «Supercomputing and Computer modelling», RFNC-VNIIEF. Sarov, 2011. P. 251–256.
7. Zwagerman M. D. High Level Synthesis, a Use Case Comparison with Hardware Description Language // Master Theses, 2015. URL: <https://scholarworks.gvsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1754&context=theses>
8. Lysakov K. F., Shadrin M. Yu. FPGA Based Hardware Accelerator for High Performance Data-Stream Processing // Pattern Recognition and Image Analysis. 2013. Vol. 23 (1). P. 26–34.

K. F. Lysakov^{1,2}, **K. K. Oblaukhov**¹, **M. Yu. Shadrin**^{1,2}

¹ *Novosibirsk State University*

2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² *Institute of Automation and Electrometry SB RAS*

1 Academician Koptuyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

lysakov@ngs.ru, obko@mail.ru, mikesha@sl.iae.nsk.su

USING FPGA TO ACCELERATE COMPUTATION OF TSUNAMI WAVEFRONT

We consider the problem of speeding up numerical calculation of tsunami wave propagation from source to the coast according to the shallow water system by using FPGA (Field Programmable Gate Array) based hardware acceleration. To compute the solution to shallow water system (neglecting external forces), special software architecture has been developed. This is equivalent to the one used in MOST (Method of Splitting Tsunami) software package to simulate wave movement through the given water area. Numerical solution to the shallow water system was done according to Mac-Cormack scheme. Precision of the developed solver was tested against the known exact solution for the case of plane slope bottom. The achieved accuracy is comparable, or even exceeds, the word recognizable software package MOST.

Keywords: tsunami simulation, code acceleration, FPGA, Mac-Cormack scheme, MOST, numerical models.

Received 12.10.2018

For citation:

Lysakov K. F., Oblaukhov K. K., Shadrin M. Yu. Using FPGA to Accelerate Computation of Tsunami Wavefront. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2018, vol. 16, no. 4, p. 79–84. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-79-84