

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦУНАМИ

Курако М.А., Диденко А.О.,
научный руководитель д-р техн. наук Симонов К.В.
Сибирский федеральный университет

Параметры природных и природно-техногенных катастроф (их сила, характер воздействия и др.) разнообразны. Многочисленность и разнообразие морских природных опасных процессов, сложность и изменчивость режима сильнейших подводных землетрясений и цунами делают актуальной проблему создания алгоритмического и информационного обеспечения для анализа данных комплексного мониторинга и оценки опасности.

Известно, что причиной большинства цунами являются подводные землетрясения большой магнитуды и определенного механизма очага, во время которых происходит резкое смещение участка морского дна. В результате над очаговой зоной возникает поднятие водной поверхности, которое затем распространяется в виде цуга волн. В работе предлагаются подходы для анализа соответствующих данных гео- и гидрофизического мониторинга с целью оперативной оценки опасности.

Геомониторинг цунамигенных землетрясений. Решение указанной задачи предполагает разработку схем типизации морских катастроф сейсмической природы и моделей единообразного описания процессов подготовки сильных цунамигенных землетрясений. В ходе исследований разработана вычислительная методика оценки параметров сильных землетрясений, включающая следующие этапы: оценка стадии сейсмического процесса для выделенной очаговой области; параметризация энергетических характеристик процесса для оценки магнитуды ожидаемого катастрофического события; построение аппроксимирующих функций, позволяющих оценить время ожидаемого катастрофического события.

На первом этапе происходит выделение области подготовки сильного цунамигенного землетрясения. Критерием для такого выделения служат признаки, характеризующие общий повышенный фон значений ряда предвестников, которые регистрируются на основе системы сейсмического мониторинга. Выполняется разделение регистрируемых сейсмических событий в анализируемой пространственно-временной последовательности на высокоэнергетические и низкоэнергетические уровни, характеризующие состояние изучаемой среды и определяющие условия возникновения сейсмической катастрофы. Для выделенной очаговой области осуществляется оценка стадий процесса подготовки сильнейшего землетрясения.

Процессы развития сейсмической катастрофы описываются в терминах определенной модели, когда состояние катастрофы в момент времени i определяется вероятностью p продолжения развития катастрофы и ее состоянием в момент $(i-1)$. Показывается, что модели катастроф, соответствующие схемам кумулятивного и мультипликативного типа, представляют собой функции перехода системы из состояния $(i-1)$ в состояние i и позволяют генерировать эмпирические распределения, присущие катастрофам разного типа.

Стадия катастрофы определяется значением параметра R , характеризующим отношение экстремального состояния к нормальному. Для 1-й стадии разброс силы катастроф и значений поражающих факторов мал, и характер распределения этих величин обычно описывается нормальным законом с малой дисперсией. При 2-й стадии катастрофы эмпирические распределения величин часто описываются

экспоненциальным законом. Функции распределения величин для 3-й стадии катастрофы в большинстве случаев достаточно хорошо описываются степенным распределением. Показано, что процесс подготовки сильного землетрясения описывается комбинацией схем кумулятивного и мультипликативного типов, где экспоненциальный закон описывает распределение энергии от землетрясений в целом, а степенной позволяет учесть наиболее сильные, но редкие значения энергии землетрясений, которыми нельзя пренебречь.

На следующем этапе анализа рассматривается «энергетический» подход описания очаговой области подготовки сильного цунамигенного землетрясения, основанный на параметризации энергетической характеристики изучаемого сейсмического процесса. В качестве характерного временного интервала изучаемого процесса берутся сейсмические периоды между двумя сильными землетрясениями $T_k = t_k - t_{k-1}$. Количественное описание сейсмического процесса в течение временного интервала T_k – это установление закономерностей в последовательности землетрясений с магнитудой в интервале между минимальным и пороговым значениями. Состояние сейсмической системы внутри сейсмического цикла описывается кумулятивными энергетическими параметрами среды, на основе которых вычисляется энтропия системы, из которой и находится оценка магнитуды ожидаемого землетрясения.

На третьем этапе на основе анализа эмпирических временных рядов $M(t)$ сейсмического мониторинга процесса подготовки сильного землетрясения для выделенных очаговых областей выполняется аппроксимация неизвестной функциональной зависимости по известным парам $(t, M(t))$. Разработанная методика позволяет быстро обрабатывать и анализировать данные, что важно, так как точность оценки параметров ожидаемого сильного землетрясения увеличивается с каждым новым сейсмическим событием.

Гидрофизический мониторинг. Прямая задача гидрофизического мониторинга распространения волн цунами в реальной акватории решается методом расщепления по направлениям с использованием программного комплекса MOST (Method of splitting tsunami). Объединение вычислительной методики решения обратной задачи совместно с методикой решения прямой задачи позволяет производить моделирование на GPU (Graphics Processing Unit).

Моделирование состоит из двух этапов. На первом этапе происходит восстановление формы очага цунами путем решения обратной задачи, основываясь на данных ближайших DART станций. На втором этапе восстановленный очаг передается на вход процедуре численного моделирования распространения волн цунами на основе программного комплекса MOST.

В цикле работ С.Ю. Доброхотова и др. предложены новые эффективные асимптотические формулы решения линеаризованной системы уравнений мелкой воды над неровным дном. Решения локализованы в окрестности фронтов, на которых с течением времени вследствие переменности коэффициентов появляются фокальные точки и точки самопересечения. Полученные формулы для асимптотических решений задачи Коши с локализованными начальными данными волнового уравнения с переменной скоростью для линеаризованной системы уравнений мелкой воды позволяют восстанавливать форму очага цунами при решении обратной задачи. Разработаны элементы вычислительной методики восстановления формы источника по мареограммам на ближайших DART станциях.

Пакет программ MOST использует модель расчета распространения волны цунами над глубоководной акваторией при помощи метода расщепления по пространственным переменным. Для численного расчета распространения волны цунами используется нелинейная система дифференциальных уравнений мелкой воды.

Модель мелкой воды хорошо описывает процесс распространения волн цунами в открытом океане при условии, что горизонтальные размеры подвижки океанического дна, генерирующие эту волну, значительно превосходят глубину океана.

Алгоритм численного решения системы строится на основе метода расщепления по пространственным направлениям. Для этого рассматриваются две вспомогательные системы, каждая из которых зависит только от одной пространственной переменной. В дальнейшем для численного решения системы достаточно построить устойчивые разностные схемы. Расчет движения волны происходит в два этапа: на первом этапе производится вычисление смещения волны вдоль оси X , на втором – вдоль оси Y . При этом расчет вдоль разных строк данных по оси X можно производить независимо. Аналогичная ситуация и для расчета вдоль оси Y . Размерность расчетного поля для акватории Тихого океана составляет 2581×2879 .

Программная реализация параллельной версии. Для реализации расчетов использованы многоядерные вычислительные системы (SMP) и графические процессоры. При переносе вычислительных алгоритмов на SMP системы использована технология OpenMP, применяемая для распараллеливания внешних расчетных циклов. Такими циклами в программном комплексе MOST являются циклы расчетов смещения волны вдоль осей. Разработанный программный модуль интегрируется в исходные коды программы MOST путем замены вычислительной части. Данный подход целесообразно применять для систем с количеством процессоров не более шести. Хорошая масштабируемость достигается для систем с числом вычислительных ядер до 4-х, после чего происходит падение производительности при использовании 8 и более вычислительных ядер. Это связано с тем, что итерации цикла выполняются очень быстро и ядрам требуется часто обращаться к общей области памяти, что приводит к частому вытеснению данных из кэша и необходимости производить синхронизацию кэшей, на что и тратится основное время.

Благодаря высокой степени параллелизма, заложенного в данном алгоритме (в силу того, что вычисления инвариантов и параметров волны вдоль осей могут производиться независимо для каждой строки/столбца данных), возможна его эффективная реализация для графических процессоров. Адаптация кода для GPU выполнена путем последовательного переноса участков кода на GPU. Размер блока нитей в расчетной сетке взят равным 16×16 потоков. Таким образом, все пространство моделирования разбито на равные блоки. Как в дальнейшем показало профилирование и вычислительные эксперименты, именно такая конфигурация является оптимальной для загрузки потоковых мультипроцессоров GPU. При этом на видеокарте NVIDIA GeForce 9800 GX2 время выполнения одной итерации составило в среднем 0.25 секунды.

Наиболее сложной в плане реализации оказалась функция расчета высоты волны. Внутри нее требовалось проводить большое количество проверок на граничные условия (наличие берегов, материков и островов) и вести интенсивное чтение данных из памяти. Для упрощения этой функции заранее выполнен просчет некоторых условий, что позволило исключить вложенные проверки. Кроме того, все необходимые для расчета данные перенесены в разделяемую память. В результате модификации кода поверхность океана перестала самопроизвольно раскачиваться, время вычисления одной итерации уменьшилось и составило в среднем 0.23 секунды на одну итерацию по времени.

Для выявления направлений дальнейшей оптимизации использовался профилировщик CUDA. Анализ показал, что несмотря на простой вид функций, вычисляющих инварианты вдоль осей, непоследовательное (некогерентное) чтение и запись происходят по 2.6 миллиона раз, в то время как последовательное (когерентное)

– всего несколько тысяч. Для того, чтобы получить последовательное чтение, произведена замена функции выделения памяти на их аналоги, производящие выделение выровненных участков памяти. В результате количество непоследовательных обращений к памяти сократилось до нуля и время обработки одной итерации по времени составило 0.037 секунды.

Для программ на CPU работа с памятью происходит эффективно, если данные в памяти расположены рядом друг с другом и легко помещаются в кэш или CPU может определить шаблон доступа к памяти, опять же заранее подгружая данные в кэш. У GPU для помещения данных в кэш можно использовать текстуры. При этом в кэш текстуры помещаются те данные, которые локализованы в двухмерном пространстве относительно данных, к которым идет обращение. Данная оптимизация привела к использованию текстурной памяти и небольшой модификации вычислительных ядер. Выигрыш от такой оптимизации составил в среднем 0.03 секунды на итерацию – около 10%. Финальное тестирование выполнено на NVIDIA Tesla C1060. Полученный результат — 0.02 секунды на итерацию, что дает выигрыш по времени на 2 порядка.

Таким образом, реализация программного комплекса MOST на параллельных архитектурах позволяет значительно увеличить производительность вычислений, уменьшая время вычислений с нескольких часов до нескольких минут. При этом применяемые оптимизации позволяют увеличить производительность OpenMP версии комплекса на порядок, а версии для графических процессоров – на 2 порядка.

Реализация системы. Для эффективной реализации системы моделирования цунами и анализа данных комплексного мониторинга за очаговыми областями сильнейших цунамигенных землетрясений применяется параллельная версия системы, разрабатываемая в настоящее время, в которой для слежения за каждым очагом выделяется отдельное вычислительное ядро. Анализируемые данные геомониторинга хранятся в базе данных, где каждая таблица базы данных представляет собой каталог землетрясений для одной выделенной области.

Структура подсистемы сейсмического мониторинга включает в себя следующие компоненты: 1) процессор-мастер, задачей которого является слежение за актуальностью данных, проверкой их корректности и обновлением данных в режиме реального времени, которое может происходить во время работы приложения; 2) процессоры-вычислители, в задачи которых входит обработка поступающих данных, относящихся к конкретному очагу и запись результатов в базу данных; 3) база данных – хранилище, содержащее первоначальные данные комплексного мониторинга, а также результаты их обработки; 4) большой экран, позволяющий оперативно, в режиме, близком к реальному времени, отображать текущую обстановку по выбранным очаговым зонам и результаты их обработки.

Распределение работы производится процессором-мастером и заключается в определении объемов всех каталогов и выделении необходимого количества ресурсов для вычислений. В силу независимости между исследуемыми очагами для обработки каждой очаговой области выделяется отдельный процессор, выполняющий функции процессора-вычислителя.

В настоящее время производится адаптация и тестирование алгоритмического и программного обеспечения для моделирования длинных волн типа цунами в открытом океане для источника, форма которого близка к реальному очагу цунами. На основе разработанной вычислительной методики выполнены численные эксперименты по моделированию распространения волн цунами в акватории Тихого океана последних цунамигенных землетрясений и цунами за период 2012-2013 гг.