

**СТРУКТУРА, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЗАДАЧИ САМАРСКОГО
АКАДЕМИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ**© 2000 В.П. Шорин¹, В.А. Соيفер², В.В. Кравчук², В.А. Фурсов¹¹Самарский научный центр РАН²Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Описывается структура высокопроизводительных ресурсов науки и образования Самарского региона, включающих кластеры вычислительных машин Института систем обработки изображений и Самарского научного центра РАН. Приводятся результаты тестирования и оценки производительности указанных кластеров. Формулируются задачи центра высокопроизводительной обработки информации, обсуждаются перспективы его развития.

Введение

В последнее десятилетие в ведущих странах мира усилилось внимание к созданию и применению высокопроизводительной вычислительной техники. Связано это с тем, что ряд глобальных проблем, возникших перед человечеством (космические исследования, управляемый термоядерный синтез, моделирование атмосферы и мирового океана, предсказание погоды и глобальных изменений в атмосфере, генетика человека и др.), могут быть решены лишь путем проведения фундаментальных научных исследований, включающих масштабные численные эксперименты или инженерные задачи с широкой областью применения (Grand challenges) [1]. Эффективное решение этих задач возможно только на современных суперкомпьютерах. В настоящее время признано экономически более выгодным концентрировать мощные вычислительные ресурсы в центрах коллективного пользования и развивать инфраструктуру удаленного доступа к ресурсам с использованием средств телекоммуникаций.

Потребности организаций Самарского научного центра (СНЦ) РАН и крупнейших ВУЗов г. Самары поставили в повестку дня создание распределенной среды науки и образования на основе центра высокопроизводительной обработки информации. Важным организационным этапом создания такого центра явилось создание в декабре 1998 г. по согласованному решению руководителей крупнейших ВУЗов и ряда научных органи-

заций г. Самары учебно-научного центра «Исследовательский университет высоких технологий» (ИУВТ). Одна из целей его создания заключалась в совместном использовании научного оборудования и развитии материальной базы фундаментальных исследований для решения проблем акустики машин, аэродинамики, прочности, цифровой обработки изображений, компьютерной оптики, автоматизированного проектирования летательных аппаратов и оптических систем, моделирования сложных систем и др.

Активная работа по созданию центра высокопроизводительной обработки информации началась с середины 1999 г. Первым этапом явилось создание однородного кластера из 4-х вычислительных машин в Институте систем обработки изображений (ИСОИ) РАН. Вторым этапом явилось создание кластера вычислительных машин в СНЦ РАН. В настоящей статье описываются топология, характеристики производительности указанных кластеров, а также обсуждаются основные задачи формируемого на их основе регионального академического центра высокопроизводительной обработки информации (ЦВОИ).

Структура центра высокопроизводительной обработки информации

Самарский региональный ЦВОИ структурно объединяет два кластера вычислительных машин: однородный кластер ИСОИ РАН и высокопроизводительный кластер СНЦ

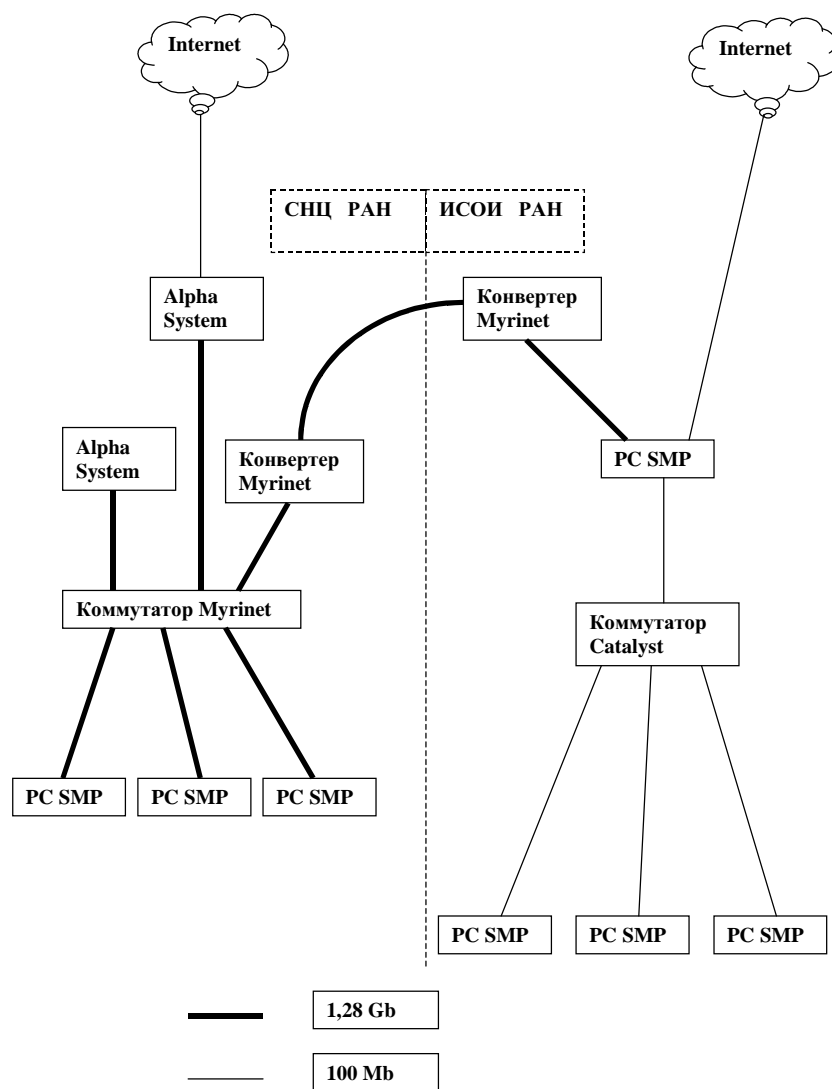


Рис. 1. Общая топологическая схема кластеров СНЦ РАН и ИСОИ РАН

РАН [2]. На рис.1 приведена общая топологическая схема кластеров ИСОИ РАН и СНЦ РАН, а на рис.2 - внешний вид кластера СНЦ РАН.

Узлами кластера ИСОИ РАН являются стандартные двухпроцессорные компьютеры с процессорами Intel Pentium II и сетевыми адаптерами Fast Ethernet (100 Mb/s). Один узел снабжен дополнительным сетевым интерфейсом, через который осуществляется удаленный доступ к кластеру. Компьютеры связаны между собой через коммутатор Catalyst 2912. Общие ресурсы кластера: 8 процессоров, 2Gb оперативной памяти и 36Gb дисковой памяти.

Кластер СНЦ РАН состоит из пяти компьютеров: главного хоста и четырех узлов. Главный хост кластера представляет собой двухпроцессорный SMP компьютер на базе материнской платы UP2000 и микропроцес-

соров ALPHA 21264DP с тактовой частотой 667 MHz. Этот компьютер оснащен 4 МВ кэш, 2 GB оперативной памяти, рейд контроллером, стриммером, флоппи дисководом 3,5". Общий объем дисковой памяти составляет 72GB, полезный объем - 54GB. В главный хост установлены три сетевых адаптера: Myrinet и два адаптера FastEthernet, через один из которых осуществляется удаленный доступ к кластеру, а второй подключен к служебной сети кластера.

Узлы кластера представлены различными типами вычислительных машин. Материнская плата и микропроцессоры первого узла кластера такие же, как у главного хоста. Он оснащен оперативной памятью объемом 1 GB, у него отсутствует рейд контроллер и стриммер, а объем дисковой памяти составляет 18GB. В нем установлены два сетевых адаптера: Myrinet и FastEthernet.



Рис. 2. Внешний вид кластера СЦ РАН

Три оставшихся узла представляют собой двухпроцессорные SMP компьютеры на базе микропроцессоров Intel Pentium III с тактовой частотой 600 MHz, в каждом из которых установлено по 512MB оперативной памяти, винчестер объемом 18GB и два сетевых адаптера: Myrinet и FastEthernet.

В качестве основной телекоммуникационной среды передачи сообщений кластера СЦ РАН используется сеть Myrinet, обеспечивающая высокую скорость передачи данных между узлами. Узлы кластера соединены между собой по логической схеме «Звезда». Схема реализована на шестнадцатипортовом коммутаторе. Служебная сеть кластера построена на FastEthernet (100Mb/c). Установленное сетевое оборудование позволяет подключить дополнительно одиннадцать узлов. Установлены также оптический канал и

конвертеры, соединяющие кластер СЦ РАН с кластером ИСОИ РАН.

На каждом компьютере кластера установлена свободно-распространяемая операционная система LINUX RedHat-6.2. На всех компьютерах работают демоны telnetd, ftpd, rshd. Служебная сеть кластера основана на стеке протоколов TCP/IP. В служебной сети используется статическая маршрутизация.

На всех компьютерах установлена коммуникационная система GM передачи сообщений для Myrinet. Эта система обеспечивает надежную доставку сообщений длиной до $2^{31}-1$ байт, работает на кластерах с большим числом узлов, автоматически определяет и поддерживает топологию сети Myrinet, обеспечивает малую задержку и имеет ряд других достоинств. В качестве системы передачи сообщений используется пакет mpich-1.1.2..13, реализующий MPI через Myrinet. На кластере установлены компиляторы языков программирования C, C++ и Fortran(gcc,g++ и g77) с соответствующими библиотеками и файлами заголовков.

Характеристики производительности кластеров

Пиковая производительность кластера ИСОИ РАН - 3,4 GFLOPS, кластера СЦ РАН - 8.9 GFLOPS. Для оценки реальной производительности кластеров и сетевых средств, на основе которых эти кластеры функционируют, проводились испытания на некоторых общепризнанных тестах.

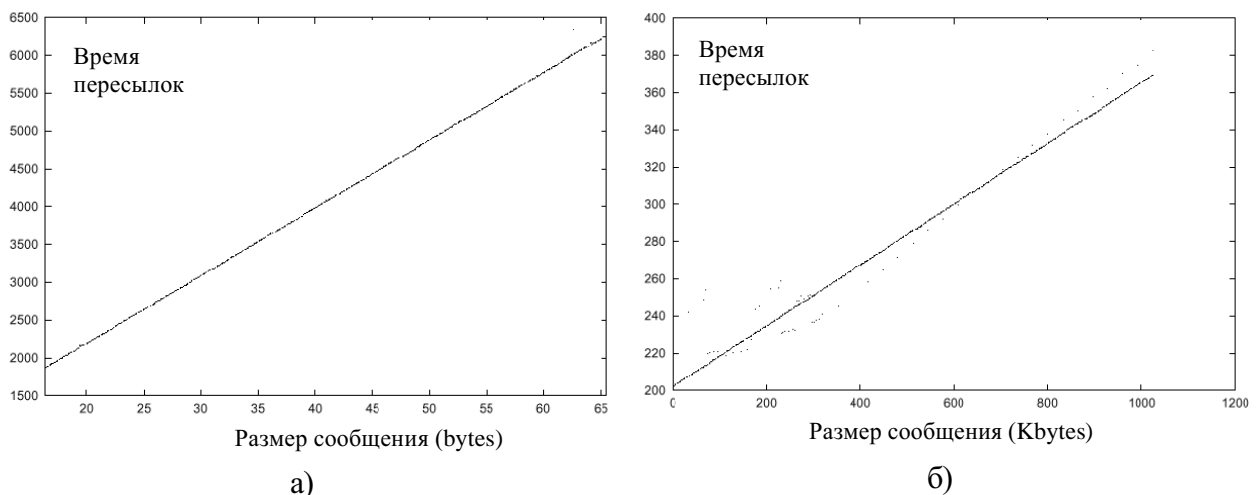
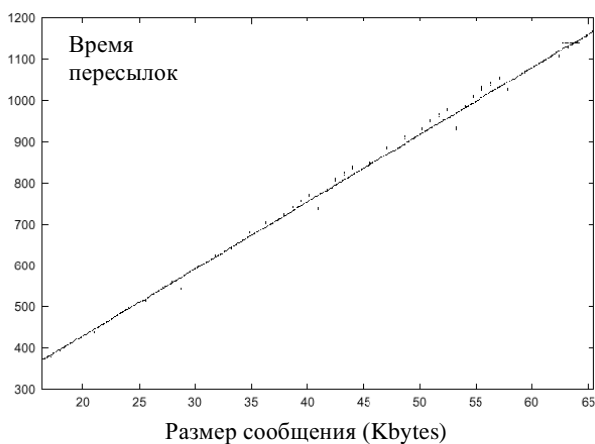
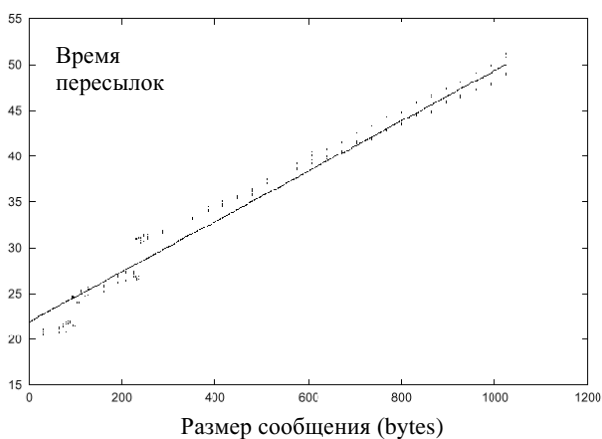


Рис. 3. Скорость пересылок по сети FastEthernet кластера ИСОИ РАН а) при малом размере сообщений, б) при большом размере сообщений



а)



б)

Рис. 4. Скорость пересылок по сети Myrinet кластера СНЦ РАН
а) при малом размере сообщений, б) при большом размере сообщений

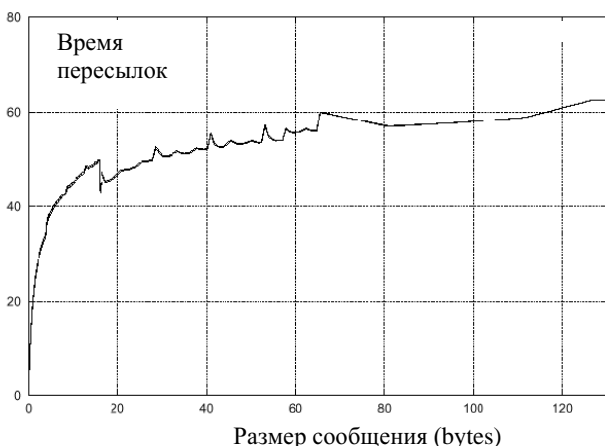
Вычислительная мощность кластера ИСОИ РАН проверялась на тестах NPВ2.3, разработанных в исследовательской лаборатории NASA. Оценка производительности сети передачи данных обоих кластеров производилась на тестах, поставляемых с пакетом *mpich*. Кластер ИСОИ РАН показал также высокую производительность на тестах NAS Benchmarks.

На рис.3 приведены результаты сетевых тестов, выполненных на кластере ИСОИ РАН, построенного на сетевой технологии FastEthernet, а на рис.4, 5 - для кластера СНЦ РАН, использующего среду Myrinet.

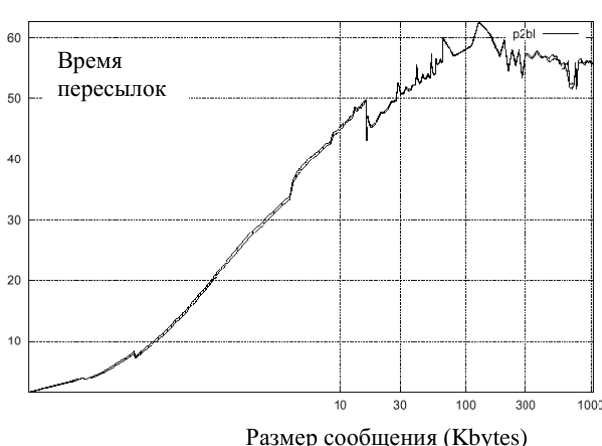
Планируется дальнейшее развитие архитектуры регионального центра высокопроизводительной обработки информации с це-

лью повышения производительности, заключающееся в интеграции ресурсов кластеров ИСОИ РАН и СНЦ РАН. Предпосылкой для этого является наличие оптического канала и конвертеров, соединяющих кластер СНЦ РАН с кластером ИСОИ РАН. Объединение мощностей кластеров может быть достигнуто с минимальным уровнем дополнительных затрат путем перевода кластера ИСОИ РАН на сетевую технологию Myrinet. При этом будет достигнуто повышение пиковой производительности центра до 12,3 GFLOPS.

В настоящее время кластеры являются доступными с любого компьютера, имеющего доступ в сеть Интернет, но могут использоваться для решения задач лишь отдельно. Например, сотрудниками ИСОИ РАН выпол-



а)



б)

Рис. 5. Производительность сети Myrinet кластера СНЦ РАН
а) при малом размере сообщений, б) при большом размере сообщений

няются научные расчеты на обоих кластерах, в частности, осуществляется моделирование прохождения электромагнитной волны через антиотражающую структуру посредством разностного решения уравнений Максвелла.

Задачи центра высокопроизводительной обработки информации

ЦВОИ открывает качественно новые возможности для развития инфраструктуры распределенной среды науки и образования, является основой для дальнейшего интегрирования имеющихся в регионе информационно-вычислительных ресурсов. Для достижения этих целей необходимо четко сформулировать основные задачи ЦВОИ. Представляется, что основные направления деятельности центра высокопроизводительной обработки информации должны состоять в следующем:

- предоставление пользователям высокопроизводительных вычислительных ресурсов, в т.ч. в режиме удаленного доступа через региональную академическую телекоммуникационную сеть науки и образования;
- проведение научных исследований по обеспечению и развитию системного и прикладного математического обеспечения и решению задач большой сложности;
- оказание помощи пользователям в разработке и распространении прикладного программного обеспечения для высокопроизводительных параллельных вычислений;
- содействие развитию дистанционного образования, предоставление пользователям информационных ресурсов (серверов, баз данных по различным областям науки и техники, образования и др.);

- интеграция ЦВОИ в информационно-вычислительную среду науки и образования, формируемую на основе суперкомпьютерной сети России;

- поддержка региональных образовательных программ, связанных с подготовкой и переподготовкой специалистов по высокопроизводительным параллельным вычислениям;

- научно-методическое содействие региональным проектам перевооружения новейшими информационными технологиями предприятий Поволжья.

Для решения указанных задач необходима концентрации усилий и средств на региональном уровне, в частности, формирование комплексной региональной целевой программы развития ЦВОИ и инфраструктуры удаленного доступа к его ресурсам. Реализация такой программы позволит Самарскому региону выйти на качественно новый уровень информационных технологий и научной поддержки промышленности, повысит инвестиционную привлекательность региона и создаст базу для его ускоренного экономического развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корнеев В.В.* Параллельные вычислительные системы. М.: Нолидж, 1999.
2. Создание центра высокопроизводительной обработки информации для нужд организаций СНЦ РАН и ВУЗов Самарской области в рамках Исследовательского университета высоких технологий // Отчет о НИР. Самара: СНЦ РАН, 2000.

PATTERN, PERFORMANCE AND PROBLEMS OF THE SAMARA ACADEMIC CENTRE OF HIGH-PERFORMANCE INFORMATION PROCESSING

© 2000 V.P. Shorin¹, V.A. Soifer², V.V. Kravchuk², V.A. Fursov¹

¹Samara Science Centre of Russian Academy of Sciences

²Image Processing System Institute of Russian Academy of Sciences, Samara

The pattern of high-performance resources of science and education of the Samara region, including computer clusters from Institute of Image Processing Systems and Samara Centre of Science of the Russian Academy of Sciences is described. The outcomes of testing and efficiency estimation of the indicated clusters are done. The tasks of centre of high-performance information processing are stated, the perspectives of its development are considered.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РАЗНОСТНОМ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

© 2000 Д.Л. Головашкин¹, В.А. Сойфер², В.А. Шустов³

¹Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

²Самарский государственный аэрокосмический университет

³Самарский научный центр РАН

Рассмотрены различные алгоритмы распараллеливания при решении сеточных уравнений явных, явно-неявных и неявных разностных схем, построенных для одномерных и двумерных задач математической физики. Приведенные результаты показывают как на эффективность распараллеливания влияет размерность задачи и тип разностной схемы.

Введение

Решение разностных уравнений требует больших временных затрат, которые иногда становятся неприемлемыми в силу срочности задачи или ограниченности доступа к вычислительной технике. Поэтому актуальна проблема построения алгоритмов, обеспечивающих поддержку параллельных вычислений и тем самым позволяющих ускорить вычисления.

В ИСОИ РАН установлен кластер, составленный из четырех двухпроцессорных компьютеров Pentium 2, с оперативной памятью 512 Мб каждый и тактовой частотой 400 МГц и 450 МГц (по два компьютера соответственно), соединенных сетью со скоростью 100Мбит. При данной конфигурации целесообразно нагружать один процессор не более, чем одним процессом и пользоваться разделенной памятью, когда процессу соответствует область памяти, которой никакой другой процесс пользоваться не может. Взаимодействие между процессами осуществляется пересылкой данных.

Разностные схемы, применяемые для решения временных задач математической физики, по способу определения искомой функции на некотором временном слое делятся на явные [1] (функция определяется через значения на предыдущем временном слое) и неявные (функция определяется через значения на текущем временном слое). Также авторы рассматривают явно-неявные схемы для решения систем дифференциаль-

ных уравнений, когда значение одной из искомых функций определяется через значения других искомых функций как явно, так и неявно.

Распараллеливание явной схемы

В качестве примера распараллеливания явной схемы рассмотрим схему, составленную для решения уравнения теплопроводности [1], записанного в одномерной декартовой системе координат. В качестве характеристик такой схемы можно отметить явность, одномерность, отсутствие времени ожидания процессами результатов работы других процессов и малые вычислительные затраты. При распараллеливании авторы использовали очевидный метод распределения сеточной области по процессам (рис.1), при котором каждому процессу отводится своя часть сетки по направлению оси Z .

Нахождение очередной строки сетки (временной слой) происходит в два этапа: сначала процессы обмениваются значениями в крайних узлах своей области сетки (рис.1) с соседними процессами, а затем вычисляют значения в узлах следующей строки.

В примере использовалась область с



Рис. 1. Реализация явной схемы.
 T – текущее время, DDt – шаг по времени

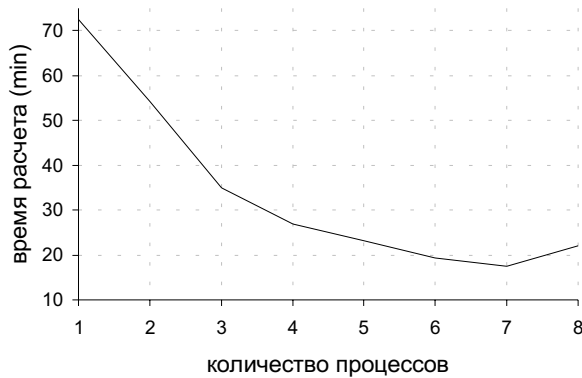


Рис. 2. Зависимость времени работы программы от числа процессов для явной разностной схемы

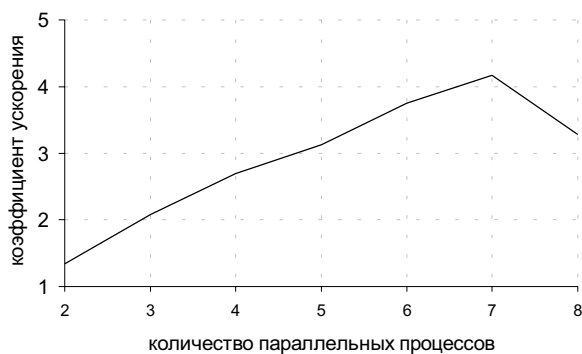


Рис. 3. Зависимость ускорения программы от числа процессов для явной разностной схемы



Рис. 4. Зависимость эффективности программы от числа процессов для явной разностной схемы

$N_z = 1512000$. Результаты работы представлены на рис.2-4:

Коэффициент ускорения вычисляется как [3]

$$k_{\text{ускорения}} = \frac{T^1}{T^N}, \quad (1)$$

а коэффициент эффективности

$$k_{\text{эффективности}} = \frac{k_{\text{ускорения}}}{N} \quad (2)$$

где T^1 - время работы программы без распараллеливания (один процесс), T^N - время работы параллельной программы с числом процессов равным N .

Некоторые авторы вводят эффективность как [3]

$$\eta = \frac{t_{\text{вычислений}}}{t_{\text{вычислений}} + t_{\text{обмена}} + t_{\text{простоя}}} \quad (3)$$

где $t_{\text{вычислений}}$ – время, которое программа потратила на вычисления, $t_{\text{обмена}}$ – время, которое программа потратила на обмен данными между процессами и $t_{\text{простоя}}$ – время, которое программа ожидала.

$$\text{Однако учитывая, что } t_{\text{вычислений}} = \frac{T^1}{N},$$

а $T^N = t_{\text{вычислений}} + t_{\text{обмена}} + t_{\text{простоя}}$, легко приходим к формулам (1), (2). Учитывая сложность работы кластера и невозможность точного определения времени обмена и времени ожидания, авторы предпочитают для определения эффективности использовать формулы (1) и (2).

По рис.3 видно, что ускорение при увеличении числа процессов имеет линейный характер до некоторого предела. Из этого можно сделать вывод о том, что несмотря на минимальное количество передаваемых данных и отсутствие времени простоя, нельзя добиться большего ускорения при увеличении числа процессов начиная с семи.

Существенным недостатком явной схемы является ограничение на шаг дискретизации. Часто таких недостатков лишены неявные схемы.

Распараллеливание явно-неявной схемы

При распараллеливании явно-неявных схем, построенных для решения системы уравнений Максвелла, авторы применяли известный алгоритм реализации продольно-поперечных прогонок [4], в котором использовали только продольные прогонок. Продольной считалась та прогонка, для реализации которой необходим один процесс. Для реализации поперечной прогонки необходи-



Рис. 5. Разбиение сеточной области при $N_z < N_y$

мо задействовать все процессы.

Схемы явно- неявного характера позволяют для нахождения напряженности электрического поля ограничиться только продольной прогонкой. Это является их преимуществом перед неявными схемами. Если сеточная область не квадратная, то появляется свобода в выборе способа распределения памяти при распараллеливании задачи. Так, для минимизации размера пересылаемых данных, а значит и времени пересылок, для количества точек сетки N_z по направлению Z и N_y по направлению Y при N_z меньше N_y целесообразно разбивать сеточную область на части по направлению Y (рис.5). А при N_z больше N_y целесообразно разбивать сеточную область на части по направлению Z (рис.6).

В качестве примера рассмотрим область, в которой $N_y = 25$, $N_z = 15120$. Используем разбиение по сеточной области, представленное на рис.6.

По рис.7-9 можно заключить о линейном характере ускорения при увеличении



Рис. 6. Разбиение сеточной области при $N_z > N_y$

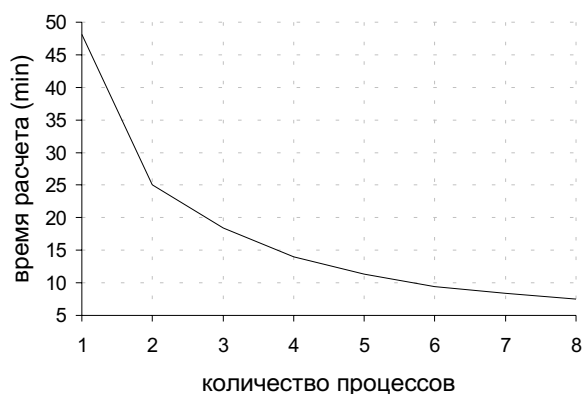


Рис. 7. Зависимость времени работы программы от числа процессов для явно- неявной разностной схемы

числа процессов. Это говорит о том, что можно добиться большей эффективности, увеличивая число процессов.

Распараллеливание неявной схемы

Однако при решении разностных схем переменных направлений не избежать поперечной прогонки. Известная конвейерная схема поперечной прогонки [4] реализуется синхронным алгоритмом распараллеливания с применением правой прогонки. Авторы предлагают использовать асинхронный алгоритм с применением как правой так и левой прогонок [5].

Представим сеточную область в виде строк и столбцов, где каждый процесс будет работать с определенным количеством столбцов. Для четной строки первый процесс будет заканчивать прямой ход левой прогонки и начинать обратный, для нечетной строки последний процесс будет заканчивать прямой ход правой прогонки и начинать обратный ход. Для нечетной строки первый процесс будет начинать прямой ход правой прогонки,

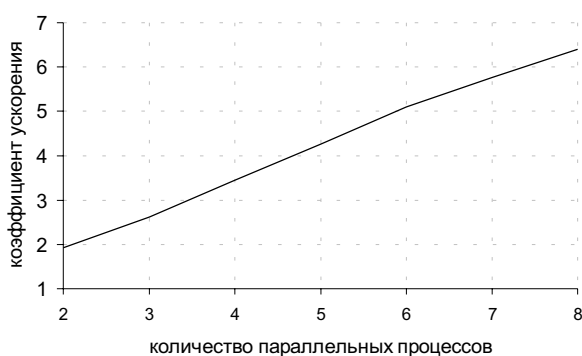


Рис. 8. Зависимость ускорения программы от числа процессов для явно- неявной разностной схемы

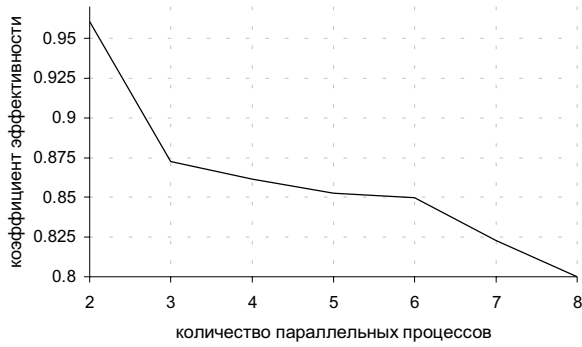


Рис. 9. Зависимость эффективности программы от числа процессов для явно- неявной разностной схемы

для четной строки последний процесс будет начинать прямой ход левой прогонки. Центральные процессы в зависимости от четности строки и ее положения (верхняя обрабатываемая или нижняя) будут продолжать прямой и обратный ход левой и правой прогонок.

Так как объем вычислений и передаваемых данных для синхронного и асинхронного алгоритма будет одинаков, то различие в их эффективности будет определяться различием во времени ожидания. Время ожидания алгоритма будет равно времени ожидания любого процесса (в случае гомогенного кластера). Для синхронного алгоритма время ожидания:

$$t_{\text{задержки}} = (N-1)(t_1+t_2) + (N-1)(t_3+t_4), \quad (4)$$

где t_1 – время прямого хода прогонки, t_3 – время обратного хода прогонки, t_2 – время передачи коэффициентов прогонки, t_4 – время передачи искомой функции (в предположении, что передача и прием происходят одновременно).

Время ожидания асинхронного алгоритма в случае, когда число строк четно, составит:

$$t_{\text{задержки}} = \left(\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 1 \right) (t_1 + t_2) + \left(\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor - 1 \right) (t_3 + t_4), \quad (5)$$

где операция $\lfloor \cdot \rfloor$ есть округление до ближайшего целого.

Таким образом время ожидания асинхронного алгоритма будет меньше, чем у синхронного. Если число строк много больше количества процессов, разница по времени исполнения программ, реализующих пред-



Рис. 10. Разбиение сеточной области для минимизации пересылок в случае неявной схемы

ставленные алгоритмы будет почти незаметной, однако при малом числе строк разница весьма существенна. Например для двух процессов, работающих с сеткой из четырех строк, в пренебрежении временем пересылки по формуле (3) эффективность синхронного алгоритма составит 2/3, а эффективность асинхронного 1.

При реализации алгоритма решения разностных уравнений неявных схем [6], построенных для решения уравнений Максвелла, с целью минимизации времени обмена данными необходимо разбить сеточную область таким образом, чтобы вектор поперечной прогонки по размеру превосходил вектор продольной прогонки (рис.10).

Для примера, приведенного в предыдущем пункте, представим результаты работы программы, реализующей асинхронный алгоритм.

В отличие от аналогичных результатов предыдущего пункта ускорение и эффективность значительно ниже, что связано с увеличением объема пересылок в три раза и необходимостью тратить время на ожидание. Однако кривые ускорения и эффективности не

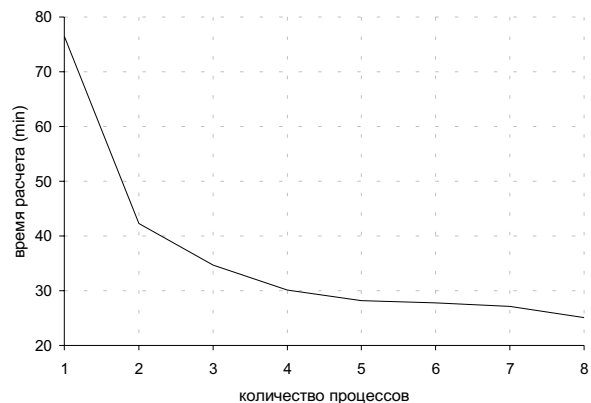


Рис. 11. Зависимость времени работы программы от числа процессов для неявной схемы

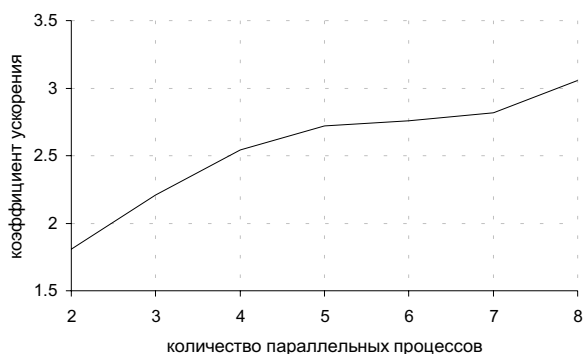


Рис. 12. Зависимость ускорения программы от числа процессов для неявной схемы

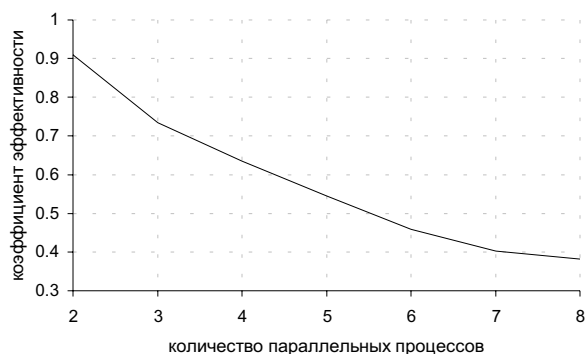


Рис. 13. Зависимость эффективности программы от числа процессов для неявной схемы

стогнируют, что позволит добиться лучшего ускорения при увеличении числа процессов.

Заключение

Повышение эффективности распараллеливания происходит при сокращении объема данных, передаваемых между процессами, и времени ожидания при том же объеме вычислений. Для минимизации объема передаваемых данных следует разбивать сеточную область таким образом, чтобы граница разбиения содержала как можно меньше узлов сетки. Время ожидания можно сократить, применяя предложенный асинхронный алгоритм реализации поперечной прогонки, использующий правую и левую прогонки одновременно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А.А. Введение в теорию раз-

ностных схем. М.:Наука, 1971.

2. Молчанов И.Н. Введение в алгоритмы параллельных вычислений. Киев: Наукова думка, 1990.

3. Вальковский В.А., Котов В.Е., Марчук А.Г., Миренков Н.Н. Элементы параллельного программирования. М.: Радио и связь, 1983.

4. Миренков Н.Н. Реализация продольно-поперечных прогонок на ВС "Минск-222" // Вычислительные системы. 1968. Вып.30.

5. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука. 1978.

6. Головашкин Д.Л., Дегтярев А.А., Сойфер В.А. Моделирование волноводного распространения оптического излучения в рамках электромагнитной теории// Компьютерная оптика. 1997. Т.17.

IMPLEMENTATION OF PARALLEL CALCULATIONS AT DIFFERENCE SOLUTION OF THE EQUATIONS OF MATHEMATICAL PHYSICS

© 2000 D.L. Golovashkin¹, V.A. Soifer², V.A. Shustov³

¹ Image Processing System Institute of Russian Academy of Sciences, Samara

² Samara State Aerospace University

³Samara Science Centre of Russian Academy of Sciences

Are reviewed the different algorithms for parallelizing at solving of the grid equations of evident, evident-nonevident and nonevident difference networks constructed for the unidimensional and bidimensional problems of mathematical physics. The outcomes show how dimension of the task and type of a difference network influence on the effectiveness of a parallelizing.

ДВУХТОЧЕЧНЫЙ ДЖИТТЕР СВР-ПОТОКА, МУЛЬТИПЛЕКСИРУЕМОГО С (Т,М)-СЛУЧАЙНЫМИ ПОТОКАМИ

© 2000 А.Ю. Привалов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Одним из показателей качества поддержки сетью ATM некоторых её служб является так называемая изменчивость задержки пакета или джиттер. В данной статье представлен метод вычисления распределения вероятностей джиттера для потока постоянной скорости, проходящего через ATM мультиплексор. Джиттер понимается согласно определению двухточечного джиттера в стандарте ATM. Прочий трафик, с которым рассматриваемый поток конкурирует за передачу, состоит из (Т,М)-случайных потоков. Главной особенностью рассматриваемого метода является требование, чтобы суммарная нагрузка мультиплексора была равна 1.

Введение

Одним из показателей качества поддержки сетью ATM некоторых служб, работающих в режиме реального времени, служит изменчивость задержки прохождения пакета по сети или, как её ещё называют, джиттер. Джиттер возникает вследствие различного времени ожидания в очереди на передачу пакетов одного и того же потока в промежуточных узлах сети.

Соблюдение ограничений относительно джиттера входит в обязательные требования к качеству службы СВР-потоков, то есть потоков постоянной битовой скорости. В данной статье мы будем рассматривать джиттер, возникающий в СВР-потоке при его прохождении через ATM мультиплексор, в котором рассматриваемый поток конкурирует за передачу с трафиком, образованным другими СВР-потоками, предназначенными для передачи по одной и той же линии.

Согласно стандарту, принятому организацией «АТМ-форум», двухточечным джиттером ATM-пакета k между двумя данными точками А и В называется разность между задержкой пакета k при его прохождении между этими точками, которую мы обозначим w_k , и задержкой w_0 прохождения между этими же точками некоторого другого пакета, принимаемого за эталонный, т.е.

$$J_k = w_k - w_0.$$

В данной статье этими двумя точками

являются вход и выход ATM мультиплексора.

Подход, используемый в данной работе, есть обобщение на двухточечный джиттер одного из подходов, использованных для анализа одноточечного джиттера [1], и для случая, когда трафик, с которым рассматриваемый СВР-поток конкурирует за передачу, состоит из (Т,М)-периодических потоков.

Одним из главных ограничений применения изложенного в статье метода является требование, чтобы нагрузка в каждом узле сети была бы равна единице. Однако именно этот частный случай с практической точки зрения представляет особый интерес при исследовании джиттера. Во-первых, сама концепция построения сетей ATM подразумевает работу при нагрузке, близкой к единице. Во-вторых, в настоящее время среди научных работников и инженеров, занимающихся проблемами сетей ATM, преобладает мнение, что для СВР-потоков необходимо резервировать пропускную способность канала и не допускать взаимодействия их с другими видами трафика. Если же пропускная способность будет резервироваться соответственно суммарной нагрузке СВР-трафика, то ситуация всегда будет ситуацией $\rho = 1$. В третьих, как показывают многочисленные исследования, джиттер при $\rho = 1$ всегда «хуже», чем при $\rho < 1$, в смысле искажения начальных временных соотношений между пакетами одного потока. Все это делает исследование случая $\rho = 1$ весьма важным.

Математическая модель

Рассматривается сеть, передающая пакеты единичной длины. Будем считать систему синхронной, то есть время в системе разделено на окна $[t-1, t)$, $t \in I_1$. (Здесь и далее принято обозначение $I_j = \{j, j+1, \dots\}$). Окно $[t-1, t)$ будем называть окном t . При этом по любой из входных линий мультимплексора приём пакета начинается в начале окна и заканчивается непосредственно перед началом следующего окна. Передача пакета из мультимплексора тоже может начинаться только в начале окна и заканчиваться непосредственно перед началом следующего.

Пусть по одной из входных линий в мультимплексор входит периодический поток пакетов с периодом T ($T \in I_2$). Без ограничения общности можно считать, что пакет i этого потока прибывает в узел в окне $t_i = 1 + (i-1)T$. Будем называть пакеты этого потока мечеными, а сам поток - меченым потоком. Джиттером этого потока мы и будем интересоваться.

Пусть по каждой из остальных входных линий в мультимплексор входят N потоков, независимых от меченого и друг от друга. Они конкурируют с меченым потоком за передачу из мультимплексора. Мы будем называть их фоновыми потоками. Будем считать, что все фоновые потоки являются так называемыми (Т,М)-случайными потоками. (Т,М)-случайным потоком по определению называется поток, обладающий следующим свойством: существует деление временной оси на кадры по T окон, в каждом из которых приходит ровно M пакетов. В каждом кадре любое из

расстановок M пакетов по T окнам равновероятно и не зависит от расстановок в других кадрах и от всех остальных событий в системе.

Легко видеть отличия (Т,М)-случайного потока от (Т,М)-периодического - у второго расстановка пакетов внутри кадра одна и та же для всех кадров, а у первого она своя в каждом кадре. Эта особенность (Т,М)-случайного потока делает его очень удобной моделью для описания того компонента реально-

го трафика в сетях АТМ, который не может быть описан детерминированным потоком, каким является (Т,М)-периодический поток.

Будем считать, что для фонового потока номер i , $1 = i = N$ параметры равны T_i и M_i . Мы рассматриваем неоднородный случай, когда для различных потоков эти параметры в общем случае могут быть различными.

Обозначим за \tilde{T} наименьшее общее кратное величин T, T_1, \dots, T_N . Мультимплексор представляет из себя систему массового обслуживания дискретного времени с одним прибором и бесконечным буфером. Обозначим за A_t количество пакетов, прибывающих в мультимплексор в окне t , за Q_t - количество пакетов, ожидающих в очереди на передачу. Тогда уравнение эволюции очереди есть

$$Q_{t+1} = \max(0, Q_t - 1) + A_t.$$

Дисциплина обслуживания для пакетов, приходящих в разных окнах - FCFS, для пакетов, пришедших в одном окне, будем считать, что меченый пакет имеет в этом случае приоритет перед фоновыми и передаётся первым. Такую дисциплину мы будем называть обслуживанием с миниприоритетом. Порядок обслуживания пришедших одновременно фоновых пакетов для нашего анализа значения не имеет.

Ключевым для дальнейшего анализа является следующее предположение: мы будем считать, что интенсивность суммарного входного потока равна 1, то есть

$$\rho = \frac{1}{T} + \sum_{i=1}^N \frac{M_i}{T_i} = 1.$$

Как известно из общих результатов теории массового обслуживания, в системе массового обслуживания с $\rho = 1$ при $t \rightarrow \infty$ с вероятностью 1 начинается период занятости, длящийся произвольно долго. Так как во время периода занятости очередь в узле по определению больше нуля, то уравнение эволюции очереди превращается в разностное уравнение

$$Q_{t+1} = Q_t - 1 + A_t.$$

Мы будем интересоваться джиттером

только тех меченых пакетов, которые прибывают в мультиплексор после начала некоторого достаточно длинного периода занятости.

Для простоты изложения предположим, что за эталонный берётся первый же меченый пакет, прибывающий в мультиплексор после начала рассматриваемого периода занятости. Пусть это пакет с порядковым номером r . Мы будем интересоваться джиттером пакетов с номерами, большими, чем r .

Анализ

Очевидно, что в данной модели задержка пакета в мультиплексоре равна количеству пакетов, находящихся впереди него в очереди в тот момент, когда он прибывает в мультиплексор. Если очередь в момент прибытия пакета i есть Q_{t_i} , то $J_n = Q_{t_n} - Q_{t_r}$.

Используя разностное уравнение для эволюции очереди, мы можем выразить Q_{t_n} через Q_{t_r} :

$$Q_{t_n} = Q_{t_r} + \sum_{t=t_r+1}^{t_n} A_t - (n-r)T,$$

откуда получаем

$$J_n = \sum_{t=t_r+1}^{t_n} A_t - (n-r)T.$$

Нетрудно видеть, что $\sum_{t=t_r+1}^{t_n} A_t$ - это число

пакетов, получивших передачу между пакетами r и n , включая и сам пакет r . Из них $n-r$ пакетов меченые, а остальные фоновые. Обозначим за $A_t^{(i)}$ количество пакетов фонового потока i , ($i=1,2,\dots,N$), прибывающих в мультиплексор в окне t (это количество есть либо

0, либо 1) и пусть $q_i = \sum_{t=t_r+1}^{t_n} A_t^{(i)}$. Введём обозначение для производящей функции случайной величины q_i :

$$h_n^{(i)}(z) = \mathbf{M}(z^{q_i}).$$

Пусть $q = \sum_{i=1}^N q_i$ и

$$G_n(z) = \mathbf{M}(z^q) = \prod_{i=1}^N h_n^{(i)}(z).$$

Будем использовать обозначение $\lfloor x \rfloor$ для целой части x . Введём обозначение:

$$S_i(z, R_1, R_2) = \sum_{k=\max(0, M_i-R_2)}^{\min(R_1, M_i)} z^k \frac{\binom{R_1}{k} \binom{R_2}{M_i-k}}{\binom{T_i}{M_i}}.$$

Пусть также $(n-r)T = QT_i + R$, где

$$Q = \left\lfloor \frac{(n-r)T}{T_i} \right\rfloor, \quad 0=R < T_i.$$

Дальнейшие результаты сформулируем в виде теоремы.

Теорема. Для n -го меченого пакета при условии, что эталонным пакетом является меченый пакет номер r , справедливо:

1. Для фонового потока i ($i=1,2,\dots,N$) с параметрами T_i и M_i , если $(n-r)T < T_i$, то

$$h_n^{(i)}(z) = \frac{T_i - R}{T_i} S_i(z, R, T_i - R) +$$

$$+ \frac{1}{T_i} \sum_{d=T_i-R}^{T_i-1} S_i(z, T_i - d, d) S_i(z, d + R - T_i, 2T_i - d - R),$$

если $(n-r)T = T_i$, то

$$h_n^{(i)} = \frac{z^{(Q-1)M_i}}{T_i} \sum_{d=0}^{T_i-R-1} S_i(z, T_i - d, d) S_i(z, d + R, T_i - d - R) +$$

$$+ \frac{z^{QM_i}}{T_i} \sum_{d=T_i-R}^{T_i-1} S_i(z, T_i - d, d) S_i(z, d + R - T_i, 2T_i - d - R).$$

2. Производящая функция распределения вероятностей джиттера может быть найдена по формуле

$$H_n(z) = \mathbf{M}(z^{J_n}) = z^{(n-r)(T-1)} G_n(z).$$

Доказательство. Обозначим через d время от начала кадра фонового потока i до момента прибытия эталонного меченого пакета. Очевидно, что d с равными вероятностями принимает значения $0, 1, \dots, T_i-1$.

Если $(n-r)T < T_i$ (тогда $(n-r)T = R$), то возможны два случая (см. рис., случаи а, б). Первый случай – когда эталонный пакет и меченый пакет n оба прибывают в течение одного кадра. Это происходит, когда $0 \leq d < T_i - R$. В этом случае независимо от конкретного значения d :

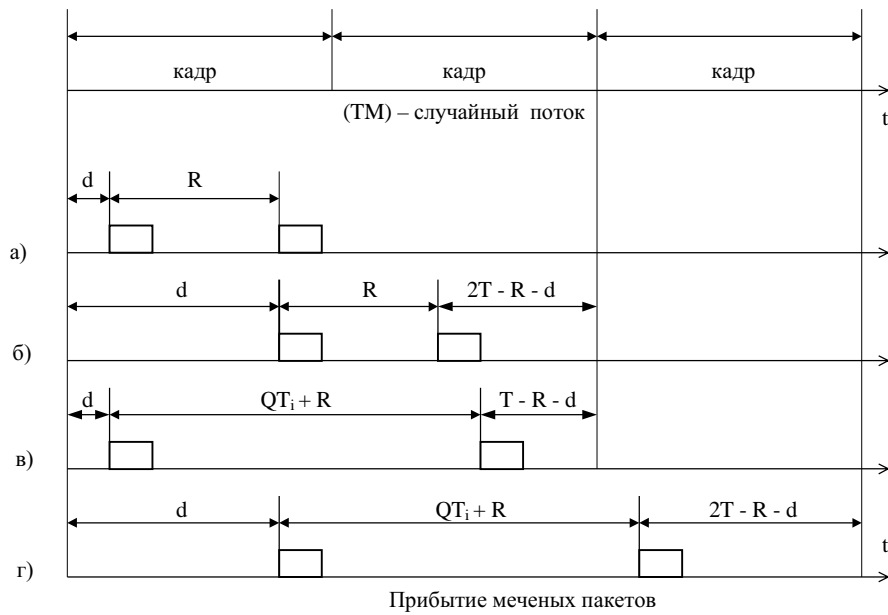


Рис. Прибытие меченых пакетов относительно границ кадров фонового потока для различных значений $(n-r)T$ и d

$$\Pr\{q_i = k | 0 < (n-r)T < T_i, 0 \leq d < T_i - R\} = \frac{\binom{R}{k} \binom{T_i - R}{M_i - k}}{\binom{T_i}{M_i}},$$

если $k = 0, \dots, \min(R, M_i)$, и 0 в противном случае.

Второй возможный случай – это когда эталонный пакет приходит в течение одного кадра данного фонового потока, а меченый пакет n приходит в течение другого, следующего кадра. В этом случае вклад в q_i вносят пакеты обоих кадров. Нетрудно видеть, что в этом случае

$$\Pr\{q_i = k + m | 0 < (n-r)T < T_i, T_i - R \leq d < T_i\} = \frac{\binom{T_i - d}{k} \binom{d}{M_i - k} \binom{d + R - T_i}{m} \binom{2T_i - R - d}{M_i - m}}{\binom{T_i}{M_i} \binom{T_i}{M_i}},$$

если $d = T_i - R, \dots, T_i - 1$, $k = 0, \dots, \min(T_i - R, M_i)$ и $m = 0, \dots, \min(d + R - T_i, M_i)$, иначе эта вероятность равна 0.

Для $(n-r)T \geq T_i$ также возможны два случая (см. рис., случаи в) и г)): когда внутри интервала из $(n-r)T$ окон попадает $(Q-1)$ или

Q кадров данного фонового потока. Первый случай, когда целых кадров $(Q-1)$, имеет место, если $0 \leq d < T_i - R$. При этом

$$\Pr\{q_i = (Q-1)M_i + k + m | T_i \leq (n-r)T, 0 \leq d < T_i - R\} =$$

$$\frac{\binom{T_i - d}{k} \binom{d}{M_i - k} \binom{d + R}{m} \binom{T_i - R - d}{M_i - m}}{\binom{T_i}{M_i} \binom{T_i}{M_i}},$$

если $d = 0, \dots, T_i - R - 1$, $k = 0, \dots, \min(T_i - d, M_i)$

и $m = 0, \dots, \min(d + R, M_i)$, иначе эта вероятность равна 0. Случай, когда целых кадров Q ,

имеет место, если $T_i - R \leq d < T_i$. При этом

$$\Pr\{q_i = QM_i + k + m | T_i \leq (n-r)T, T_i - R \leq d < T_i\} =$$

$$\frac{\binom{T_i - d}{k} \binom{d}{M_i - k} \binom{R + d - T_i}{m} \binom{2T_i - d - R}{M_i - m}}{\binom{T_i}{M_i} \binom{T_i}{M_i}},$$

иначе эта вероятность равна 0. Собирая все эти случаи в одну формулу, заканчиваем доказательство пункта 1 теоремы.

Для доказательства пункта второго, заметим, кроме фоновых, необходимо учесть также $(n-r)$ меченых пакетов (включая эталонный), и потом из получившегося числа паке-

тов, выходящих из мультиплексора между эталонным и n -ым меченым, отнять $(n-r)T$, чтобы получить величину джиттера. Переходя от действий со случайными величинами к действиям с их производящими функциями, завершаем доказательство пункта 2 теоремы.

Отметим следующее обстоятельство относительно зависимости распределения вероятностей джиттера от номера меченого пакета: если $(n-r)T = \max_i(T_i)$, то распределение вероятностей джиттера для пакетов с номерами n и $(n + \tilde{T}/T)$ совпадают. Действительно, рассмотрев $h_n^{(i)}(z)$ из первого пункта теоремы, вычисленную для пакета номер n , и $h_{n+\tilde{T}/T}^{(i)}(z)$ – ту же функцию, вычисленную для пакета номер $(n + \tilde{T}/T)$, не трудно получить, что

$$h_{n+\tilde{T}/T}^{(i)}(z) = z^{k_i} h_n^{(i)}(z),$$

где $k_i = \tilde{T}M_i/T_i$. Используя определение $G_n(z)$, имеем

$$G_{n+\tilde{T}/T}(z) = z^k G_n(z),$$

где $k = \tilde{T} \sum_{i=1}^N M_i/T_i$. Отсюда для производящей функции джиттера $H_n(z)$ пакета n и для производящей функции джиттера $H_{n+\tilde{T}/T}(z)$ пакета $(n + \tilde{T}/T)$ имеет место соотношение

$$H_{n+\tilde{T}/T}(z) = z^s H_n(z),$$

где

$$s = \tilde{T} \left(\frac{1}{T} + \sum_{i=1}^N \frac{M_i}{T_i} \right) - \tilde{T}.$$

Используя условие единичной нагрузки, обнаруживаем, что $s=0$, то есть

$$H_{n+\tilde{T}/T}(z) = H_n(z).$$

Это свойство означает, что любой меченый пакет с номером $n > r$, и такой, что $(n-r)T = \max_i(T_i)$, может иметь только одно из \tilde{T}/T распределений в зависимости от остатка от деления $n-r$ на число \tilde{T}/T . В разделе

численных результатов мы рассмотрим конкретный пример такого рода зависимости. Если же мы интересуемся распределением джиттера произвольного меченого пакета (со случайно выбранным номером), то остаток от деления его номера на число \tilde{T}/T может с равной вероятностью принимать значения от 0 до \tilde{T}/T и, соответственно, если считать вклад тех пакетов, у которых $(n-r)T < \max_i(T_i)$ статистически несущественным, то распределение вероятностей джиттера произвольного меченого пакета есть смесь распределений:

$$H(z) = \frac{\tilde{T}}{T} \sum_{n=\tilde{T}/T}^{2\tilde{T}/T-1} H_n(z).$$

Численные результаты

Для примера вычислений по формулам данной статьи выбрано две ситуации с одним и тем же периодом меченого потока $T=5$ и с различными фоновыми потоками. Результаты представлены в таблице. В случае 1 фоновый трафик состоит из одного потока с параметрами $(T_1=5, M_1=1)$ и шести потоков с параметрами $(T_2=10, M_2=1)$; в случае 2 фоновый трафик состоит из одного потока с параметрами $(T_2=5, M_2=1)$ и двух потоков с параметрами $(T_2=10, M_2=3)$. Во всех этих случаях $\tilde{T}=10$, $\tilde{T}/T=2$, и потому меченые неэталонные пакеты, у которых $(n-r)T \geq 10$, могут иметь два возможных распределения вероятностей для джиттера в зависимости от чётности их номера. Кроме того, для пакета с номером $n=r+1$ имеем $(n-r)T=5 < 10$, и распределение джиттера для него будет особым. Оно также приведено в таблице.

Как видно из таблицы, распределения вероятностей пакетов с чётными и нечётными значениями $(n-r)$ заметно отличаются друг от друга и от особого распределения джиттера пакета $n=r+1$. Распределение джиттера пакета $n=r+1$ несимметрично относительно 0, а для других пакетов распределение джиттера симметричное. Распределение джиттера для пакетов с нечётным $(n-r)$ имеет

Таблица. Распределение вероятностей джиттера

J_n	Случай 1			Случай 2		
	$n=r+1$	$(n-r)$ чётн.	$(n-r)$ нечёт.	$n=r+1$	$(n-r)$ чётн.	$(n-r)$ нечёт.
-10	0	0	1.0E-11	0	0	0
-9	0	0	1.5E-9	0	0	0
-8	0	0	9.6E-8	0	0	2.0E-8
-7	0	3.2E-6	3.4E-6	0	8.4E-7	1.9E-7
-6	0	9.2E-5	7.2E-5	0	3.1E-5	9.0E-6
-5	0	0.0012	9.6E-4	0	5.0E-4	2.4E-4
-4	0.0032	0.0083	0.0078	0.0016	0.0046	0.0036
-3	0.0302	0.0373	0.0377	0.0199	0.0263	0.0263
-2	0.1124	0.1096	0.1120	0.0962	0.0962	0.1017
-1	0.2247	0.2114	0.2113	0.2328	0.2216	0.2235
0	0.2726	0.2644	0.2602	0.3056	0.3016	0.2895
1	0.2107	0.2114	0.2113	0.2250	0.2216	0.2235
2	0.1052	0.1096	0.1120	0.0937	0.0962	0.1017
3	0.0335	0.0373	0.0377	0.0221	0.0263	0.0263
4	0.0067	0.0083	0.0078	0.0029	0.0046	0.0036
5	8.2E-4	0.0012	9.6E-4	2.0E-4	5.0E-4	2.4E-4
6	6.3E-5	9.2E-5	7.2E-5	8.4E-6	3.1E-5	9.0E-6
7	3.0E-6	3.2E-6	3.4E-6	1.9E-7	8.4E-7	1.9E-7
8	8.9E-8	0	9.6E-8	2.0E-9	0	2.0E-8
9	1.5E-9	0	1.5E-9	0	0	0
10	1.0E-11	0	1.0E-11	0	0	0

больший носитель и более тонкие хвосты, чем то же распределение для пакетов с чётным $(n-r)$. Представленные в таблице результаты получены с помощью программы символьных вычислений «Mathematica». Заметим однако, что символьные вычисления, используемые в данной работе, сводятся к умножению, делению и интегрированию многочленов. Все эти действия могут быть реализованы через дискретные свертки и арифметические действия с по-

следовательностями коэффициентов этих многочленов, что при необходимости позволяет реализовать по формулам данной статьи средствами обычного языка программирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Privalov A., Sohraby K. Per-Stream Jitter Analysis in CBR ATM Multiplexors. // IEEE Translation on Networking. 1998. Т.6. №.2.

TWO-POINT JITTER FOR CBR-STREAM MULTIPLEXED WITH (T, M) RANDOM STREAMS

© 2000 A.Yu. Privalov

Samara State Aerospace University

One of quality criteria of support by a web ATM some its services is the so-called variability of delay of the package or jitter. In this paper the method of evaluation of a probability distribution of jitter for constant speed stream passing through ATM the multiplexer is represented. Jitter is understood according to definition of two-point jitter in the standard ATM. The other traffic, which competes to considered stream for transmission, consists from (T, M) random streams. Key feature of a considered method is the requirement, that the total loading of the multiplexer was equal 1.

СИСТЕМА ВИРТУАЛЬНОЙ И РЕАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИЙ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

© 2000 В.С.Казакевич, С.П.Котова, А.Л.Петров, Т.Н.Сапцина, П.О.Скобелев

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

В данной работе авторы предлагают использовать в одном образовательном комплексе для физического практикума в вузе и в школе ряд возможностей, сочетающих традиционные методы преподавания и преимущества новых информационных технологий. Предлагаемая концепция реализована по теме «Дифракция света» и может послужить моделью для создания подобных систем по другим разделам физического практикума.

В настоящее время, справедливо называемое веком информационных технологий, когда персональные компьютеры и Интернет становятся все более и более доступными, появляется реальная возможность получения полноценного образования вне зависимости от места жительства и качества образовательного учреждения. Информационные технологии могут предоставить доступ к огромному ресурсу знаний во многих отраслях, позволят приблизить, увидеть и «взять в руки» объект, находящийся за тысячи километров. Этот мощный ресурс можно использовать для постановки на новом уровне физического практикума в вузе и в школе. В данной работе авторы, основываясь на многолетнем опыте преподавания на кафедре оптики и спектроскопии Самарского государственного университета, предлагают использовать в одном образовательном комплексе ряд возможностей, сочетающих традиционные методы преподавания и преимущества новых информационных технологий:

- реальную полноценно оборудованную лабораторию - как базовую систему;
- виртуальную лабораторию на основе этого реального прототипа;
- компьютерные модели физических процессов;
- рассылку описаний реальных полномасштабных лабораторных работ через Интернет.

Известно, что преподавание физики постоянно сталкивается со сложностью демонстрации экспериментов и постановки лабораторных работ для учащихся. Это особенно

важно в настоящее время, когда высокая стоимость экспериментального оборудования и трудоемкость постановки учебных экспериментов являются серьезным препятствием для создания полноценного физического практикума. Предлагаемый подход может существенно упростить эти проблемы - является реальная возможность организации эффективного физического практикума вне зависимости от наличия в учебном заведении полного набора лабораторного оборудования.

Актуальность подхода обусловлена несколькими факторами. Во-первых, нельзя не отметить, что в результате перестройки системы образования в России обучение физике, как и другим естественнонаучным дисциплинам, оказалось в сложном положении. Финансовые трудности, непрерывно испытываемые образовательными учреждениями, оставляют учебную лабораторную базу без должной поддержки. И если для гуманитарного образования в последнее время существует возможность развития при помощи грантов зарубежных благотворительных организаций, в физическом образовании, как и вообще в естественнонаучном, нужно рассчитывать исключительно на внутренние ресурсы.

Во-вторых, естественнонаучное образование нуждается в повышенном внимании, так как существующая тенденция переориентации на гуманитарное образование может повлечь снижение уровня подготовки физиков в университетах (например, из-за отсут-

ствия полноценной учебной лабораторной базы), за чем последует снижение уровня преподавания физики в школах. Это, в свою очередь, может привести к дальнейшему падению престижа инженерной и физической специальности у молодых людей. Таким образом, в стране, имевшей передовые позиции во многих отраслях науки и техники, через некоторое время может возникнуть дефицит собственных квалифицированных специалистов, что нежелательно, и даже недопустимо в мире сложнейших технических систем, неквалифицированная эксплуатация которых может привести к авариям и техногенным катастрофам.

В третьих, во многих развитых странах у молодежи отмечается уменьшение интереса к естественным наукам, в частности, к физическим дисциплинам. Поэтому преподнесение материала с использованием реальных экспериментов и всех возможностей информационных технологий, демонстрация явлений во всей гармонии и красоте может послужить средством привлечения новых сил в эту область знаний.

В настоящее время существует ряд обучающих программ по физике на компакт дисках [1-3] и в сети Интернет. В Интернет представлены в основном рекламы обучающих программ для школьного курса физики на компакт дисках, сами обучающие программы предлагается приобретать отдельно [4,5], а небольшие доступные обучающие ресурсы - это сканированные страницы учебников [6] или анимированные математические модели. Цельной же системы, комплексно использующей возможности информационных технологий в каком-либо разделе физики, нам обнаружить не удалось.

Предлагаемый подход реализован на основе лабораторного комплекса, расположенного в Учебно-научной лаборатории Самарского филиала ФИАН, с использованием обучающего мультимедиа диска «Дифракция» и одноименного сайта в Интернет (<http://www.kg.ru/diffraction>) [7-9]. Эта система посвящена одному из самых красивых и сложных разделов оптики – дифракции света. Возможности мультимедиа не только облегчают восприятие такого сложного и необычного

явления как дифракция, но и позволяют продемонстрировать его удивительную красоту.

Представляется интересным при помощи современных средств мультимедиа воспроизвести обстановку лаборатории в виде, максимально приближенном к реальности, для того чтобы ознакомить учащегося с реальной лабораторией, подготовить к эксперименту или заменить эксперимент (при отсутствии реальной лаборатории). То, что виртуальная лаборатория разработана на основе конкретного существующего оборудования и с максимальным эффектом правдоподобия изображений, дает эффект узнавания в ситуации реальной лаборатории.

Реальная лабораторная установка комплекса находится в Учебно-научной лаборатории Самарского научно-образовательного центра подготовки специалистов по оптике и лазерной физике (СамГУ - СФ ФИАН). Оптика, лазерная физика и оптоэлектроника лежат в основе многих современных высоких технологий и технологий будущего. В лаборатории поставлены работы по изучению различных лазерных и оптических систем, в ряде случаев с использованием уникальных экспериментальных установок. Лаборатория предусматривает возможность постановки экспериментов различной сложности по курсу оптики и лазерной физики, включая изучение источников и приемников излучения, элементов современной оптоэлектроники (световодов, пространственно-временных модуляторов света и других), вплоть до выполнения исследовательских работ.

Составной частью лаборатории является-

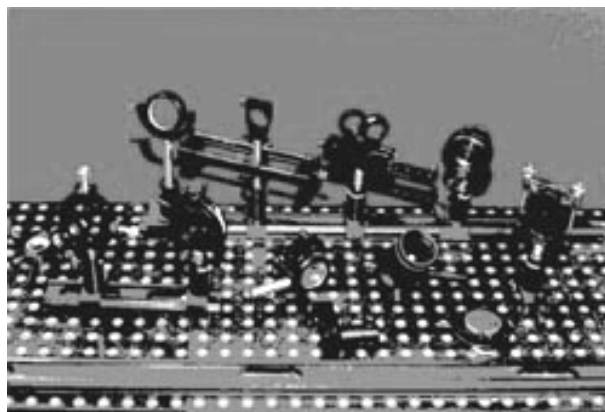


Рис. 1. Внешний вид учебно-лабораторного комплекса

ся учебно-лабораторный комплекс по курсу «Оптика» «Опыты со светом», разработанный для проведения лабораторных работ и демонстрационных экспериментов по оптике для школ с углубленным изучением физики, средних специальных учебных заведений, а также ВУЗов. В нее входят: четыре источника светового излучения, монохроматор, осциллограф, фотоприемник, гранитная плита с направляющими рельсами, разнообразные оптические элементы (наборы линз, зеркал, световоды, светофильтры, поляризатор, голограммы и т.д.) с элементами крепежа (рис.1).

В виртуальной лаборатории можно выделить несколько частей. Первая часть - это размещенное на диске «Дифракция», сконструированное в редакторе трехмерных изображений, помещение виртуальной лаборатории с набором оборудования для 6 экспериментов, в котором пользователь может «ходить», «брать» со стеллажа элементы, ставить на оптический стол и, «перемещаясь» по лаборатории, наблюдать ход лучей лазера в оптической схеме. Внешний вид оптических элементов разработан по чертежам оборудования, имеющегося в реальной лаборатории (рис.2). В лаборатории воссозданы блики лазерного света на поверхности оптических элементов и оправках, освещенные места стены, мерцание пылинок в луче лазера.

Вторая часть виртуальной лаборатории - это раздел «Задания» на диске. При обращении к этому разделу пользователю предлагается список лабораторных работ по 4 темам: «Дифракция Френеля», «Дифракция Фраунгофера на одиночных отверстиях», «Дифракция Фраунгофера на наборе отвер-

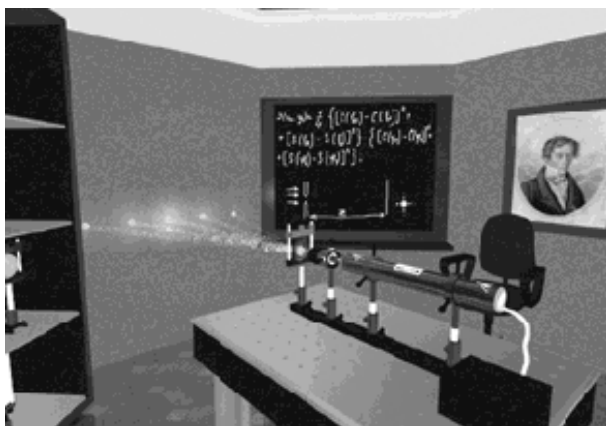


Рис. 2. Виртуальная лаборатория

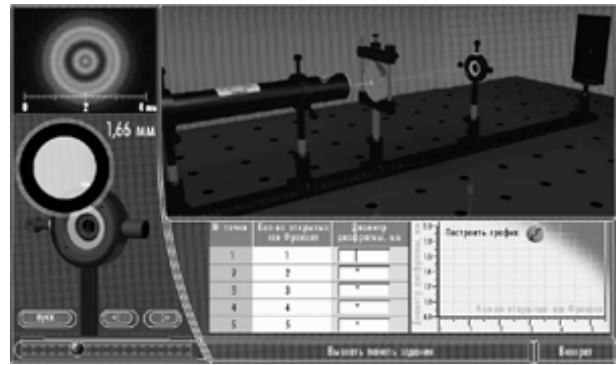


Рис. 3. Экран задания

стей», «Дифракционная решетка» - всего 20 заданий - каждое из которых по сюжету представляет собой полноценную лабораторную работу.

Сначала учащемуся предлагается описание лабораторной работы - внешний вид установки, перечень элементов (часть из которых он мог видеть в виртуальной лаборатории), описание задания. Затем учащийся переходит к выполнению задания. На основном экране представлен внешний вид экспериментальной установки, на дополнительных - вид экрана наблюдения, вид основного элемента схемы, таблица для занесения результатов измерения, поле графика (рис.3). Учащемуся предлагается при помощи «виртуальной» линейки произвести необходимые измерения, занести результаты в таблицу, затем построить график. После выполнения работы учащийся должен ответить на контрольный вопрос по результатам задания. Завершается работа анализом правильности выполненных действий.

Изображения дифракционных картин, предлагаемых учащимся в заданиях, частью являются видеокадрами записей реальных экспериментов (рис.4), частью - результатом модельных расчетов и обработки изображе-

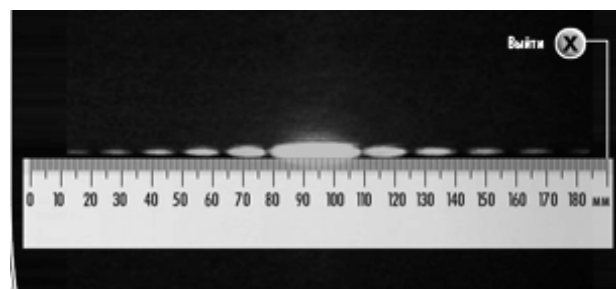


Рис. 4. Экспериментально полученная картина дифракции на щели

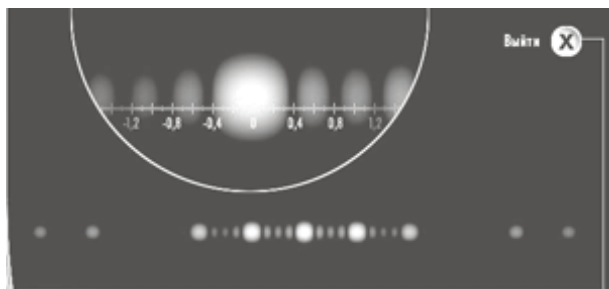


Рис. 5. Картина дифракции на 5 щелях, полученная в результате моделирования

ния в графическом редакторе, которое проводилось с целью добиться наибольшего сходства с экспериментом (рис.5).

Практикум в виртуальной и реальной лаборатории дополняется еще одним видом экспериментов - это компьютерные модели физических процессов, которые учащиеся могут располагать на своих компьютерах и проводить виртуальные эксперименты в реальном времени. Интерактивные программы преследуют цель показать сходство и различие реальных видеосъемок и математических моделей. Они также могут познакомить учащихся со сложными эффектами, которые не всегда легко получить даже в научной лаборатории. В нашей системе эти модели пользователи могут получить через Интернет с сайта «Дифракция» (рис.6).

Еще одна интересная часть виртуальной лаборатории - это раздел сайта «Домашние опыты». Он содержит описание интересных экспериментов, которые можно поставить без сложного оборудования, пользуясь обыч-

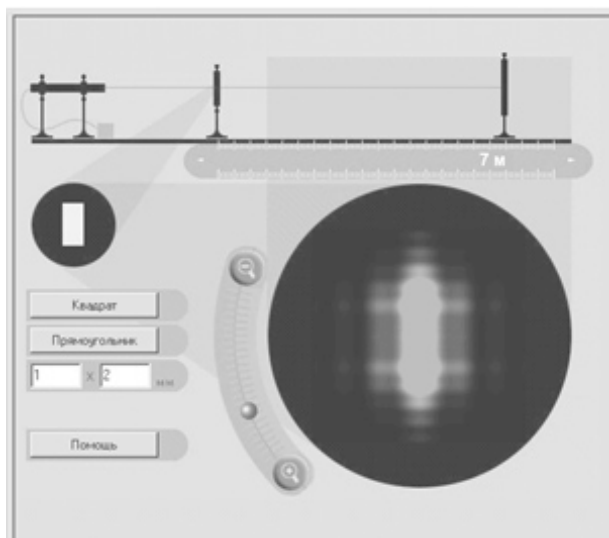


Рис. 6. Интерактивная программа

ными предметами даже в домашних условиях (рис.7).

Выполнив отдельные эксперименты на настоящем оборудовании и дополнив их виртуальными, либо наоборот, сначала проработав задания в виртуальной лаборатории, а затем, совершив экскурсию в реальную, учащиеся за короткое время могут получить полную картину проявлений физического закона. Существенную поддержку физическому практикуму в конкретном учебном заведении может оказать возможность получить описание и фото отчет полномасштабной лабораторной работы, которую можно поставить у себя в лаборатории.

Ключевым моментом предлагаемой системы является возможность посещения реальной лаборатории, которая может быть одна на большое количество учебных заведений в регионе. Учебные группы ВУЗов и классы школ могут посещать такую лабораторию по расписанию 1 раз в месяц или реже. После полномасштабного проведения экспериментов в виртуальной лаборатории, всестороннего рассмотрения различных аспектов изучаемого явления, внешнего вида лабораторного оборудования, ответов на контрольные вопросы, живое посещение реальной, учебной или научной лаборатории будет значительно эффективнее. Для учащихся Самары это можно сделать в Учебно-научной лаборатории Самарского филиала ФИАН.

Не каждое учебное заведение может позволить себе иметь полномасштабный лабораторный комплекс. Но обучающего диска, сайта в Интернет и возможности совершить экскурсию в реальную лабораторию может быть достаточно для полноценного усвоения экспериментального материала.

Данная концепция реализована по теме «Дифракция света» и может послужить моделью для создания подобных систем по другим разделам физического практикума. Кроме того, развитие системы может продолжаться вглубь, например, организацией удаленного доступа в лабораторию через Интернет.

Авторы благодарят преподавателей СамГУ, сотрудников СФ ФИАН и коллектив программистов компании «Генезис Знаний»

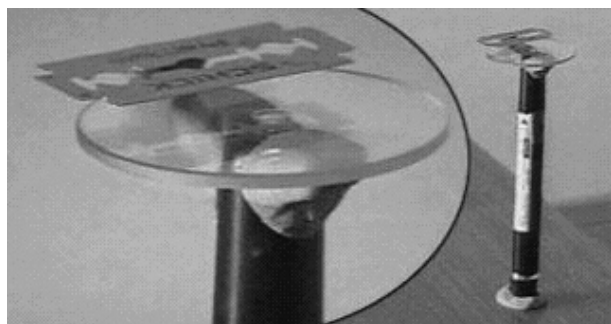


Рис. 7. Опыт с лазерной указкой

за помощь в создании системы. Особую признательность авторы выражают С.В.Лопухову, благодаря идеям и усилиям которого сайт и диск реализовались в представленном виде. Работа выполнена при поддержке Фонда Сороса (грант № #IEA71I) и Федеральной целевой программы «Интеграция» (проект № 21-235).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Школьный курс физики. Эл. учебник. 1999.
2. Открытая физика 1.0. Ч.2. Эл. учебник. М.: Физикон, 1997.
3. Задачник по физике. Оптика. Волны. Эл. учебник. М.: Медиа пубблишинг, 1997.
4. <http://www.1c.ru/repetitor/Hyper/physics.htm>
5. <http://www.ipk.edu.yar.ru/resource/distant/physics/dozorov/paket.htm>
6. <http://www.bashedu.ru/kafedry/algeom/sharipov/electr-1.htm>
7. Жукова В.А., Зверев М.В., Иванова А.М., Казакевич В.С., Котова С.П., Лопухов С.В., Сапцина Т.Н., Скобелев П.О., Фролов Д.М. Мультимедиа-система «Дифракция света» // Труды международной конференции «Физика в системе современного образования». 1999. Т.3.
8. Иванова А.М., Казакевич В.С., Лахин О.И., Котова С.П., Лопухов С.В., Самородинов Д.В., Сапцина Т.Н., Скобелев П.О. Оптика в INTERNET: Дифракция // Труды международной конференции «Физика в системе современного образования». 1999. Т.3.
9. Жукова В.А., Казакевич В.С., Котова С.П., Лопухов С.В., Майорова А.М., Петров А.Л., Сапцина Т.Н., Скобелев П.О., Самородинов Д.В., Фролов Д.М. Гибридная система дистанционного обучения по оптике (дифракция света) // Материалы второй Байкальской научной школы по фундаментальной физике. Иркутск: Иркутский университет, 1999.

THE SYSTEM OF VIRTUAL AND REAL LABORATORIES FOR STUDENT PRACTICAL WORKS ON PHYSICS

© 2000 V.S. Kazakevich, S.P. Kotova, A.L. Petrov, T.N. Saptina, P.O. Skobelev

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Levedev
of Russian Academy of Sciences

At present work authors propose to apply in one educational system for student training work on physics for universities and schools the complex combining the traditional methods and advantages of new informational technologies. Presented conception is realized for theme «Diffraction of light» and can be a model for creation of similar systems for other section of physics.