УДК 004.94, 004.424, 519.633, 519.683, 535.12

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ АТМОСФЕРНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

П. А. Коняев

Учреждение Российской академии наук
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения РАН,
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
E-mail: peter@iao.ru

На основе современных технологий параллельного программирования создано программное обеспечение для компьютерного исследования алгоритмов и схем адаптивной оптики в атмосферных лазерных приложениях. Модель адаптивной оптической системы (АОС) включает в себя: геометрии излучающей апертуры и трассы распространения пучка; вертикальные профили параметров атмосферы; параллельный алгоритм расщепления с фурье-преобразованием для решения уравнений дифракции и распространения волн; динамическую модель «замороженной» атмосферной турбулентности с большим диапазоном масштабов; модели датчика волнового фронта и управляемого деформируемого зеркала. В качестве вычислительного устройства использовался стандартный настольный системный блок, содержащий 6-ядерный 12-потоковый процессор Intel® Core^{TM} i7-970 с максимальной частотой 3,5 ГГц и графический ускоритель NVIDIA® GeForce GTX 580, имеющий 512 универсальных процессоров, работающих на частоте 1,5 ГГц. Представлены результаты моделирования АОС для формирования изображения и фокусировки лазерных пучков в целях оценки эффективности адаптивной оптики на атмосферных трассах.

Ключевые слова: адаптивная оптика, лазерные системы, турбулентная атмосфера, компьютерное моделирование, параллельные алгоритмы.

Введение. Со времени опубликования первых работ по компьютерному исследованию задач волновой физической оптики, в частности моделированию оптических и лазерных систем [1–3], прошло уже более 30 лет. За эти годы методы численного решения уравнений лазерной оптики получили широкое распространение и привели к созданию вычислительных алгоритмов и программ для моделирования волновых процессов, включая нелинейные и стохастические [4, 5]. Однако в последнее время технологии программирования претерпели существенные изменения: в практику научных исследований и инженерных приложений интенсивно внедряются алгоритмы параллельных вычислений. Фирмы-изготовители программного обеспечения предоставляют для разработчиков прикладных программ интерфейсы и библиотеки стандартных и специализированных математических функций (например, Intel MKL и IPP, NVIDIA CUDA Toolkit и т. д.), реализованных на основе быстродействующих алгоритмов с параллельной архитектурой. Использование этих функций при программировании даёт выигрыш не только в скорости вычислений, но и расширяет круг решаемых задач: на компьютерных моделях исследователи получают возможность изучать более тонкие физические явления, решая уравнения численно на многомерных сетках с большим числом измерений и узлов сеток. Также существенно улучшаются параметры и технические характеристики проектируемых и реализуемых систем, работающих с применением параллельных технологий (например, модификация PALM-3000 адаптивной системы PALMAO для 5,1-метрового телескопа "Hale" [6]).

Параллельные алгоритмы дают многократное ускорение вычислений в тех задачах, которые допускают распараллеливание операций. К ним, безусловно, относятся решения многомерных скалярных уравнений волновой и адаптивной оптики (задачи дифракции и распространения волн). Эти вычисления лежат в основе практически любой численной

модели оптической системы и являются наиболее трудоёмкими. Однако существующие алгоритмы таких вычислений построены по принципам последовательного программирования и предназначены для выполнения одним процессором [4]. Для использования в многоядерных процессорах и графических ускорителях алгоритмы необходимо было модифицировать [7].

Дальнейшим развитием применения технологий параллельного программирования в компьютерном моделировании адаптивной оптики является данная работа. В ней рассмотрены основные уравнения, вычислительные алгоритмы и особенности их применения для моделирования в атмосферной оптике, а также приведены результаты численных расчётов эффективности адаптивной оптической системы (АОС) при формировании изображений и фокусировке пучков в атмосфере.

Моделирование распространения оптических волн в атмосфере. Для описания процесса распространения когерентного лазерного пучка в неоднородной преломляющей среде, каковой является незамутнённая атмосфера, используется уравнение комплексной амплитуды $U(\mathbf{r}, z)$ в параболическом приближении:

$$2ik\frac{\partial U(\mathbf{r}, z)}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 U(\mathbf{r}, z) + 2k^2 n_1(\mathbf{r}, z)U(\mathbf{r}, z), \tag{1}$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число (λ — длина волны); $n_1(\mathbf{r}, z)$ — вариации показателя преломления среды; $\mathbf{r} = (x, y)$ — поперечные координаты; z — продольная координата, выполняющая роль эволюционной переменной. Численное решение этого уравнения состоит в переходе к его дискретному аналогу с заменой непрерывных функций на сеточные и задании начальных условий (в данном случае при $z = 0$) и условий на границах сеток (которые полагаются нулевыми). Как правило, начальные условия для лазерного пучка в поперечном сечении $z = 0$ задаются в виде модели гауссова ($j = 1$) либо супергауссова ($j > 1$) профиля с амплитудой U_0:

$$U(x, y) = U_0 \exp\Big(-\frac{1}{2}\Big[\frac{(x^2 + y^2)^j}{a_0^2} + i\frac{x^2 + y^2}{F_0^2}\Big]\Big). \tag{2а}$$

Иногда используется также гипергауссова форма распределения (j чётное):

$$U(x, y) = U_0 \exp\Big(-\frac{1}{2}\Big[\frac{x^j + y^j}{a_0^2} + i\frac{x^2 + y^2}{F_0^2}\Big]\Big). \tag{2б}$$

Здесь a_0 — радиус пучка, F_0 — радиус фокусировки. Эффективный метод решения уравнения (1) хорошо известен — это сочетание метода расщепления и алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) [4]. В [7] подробно изложен этот метод для реализации на параллельных алгоритмах и приведено их сравнение с последовательным алгоритмом. В качестве базовых процедур фурье-преобразования применяются функции DFTi из библиотеки Intel MKL и CUFFT из NVIDIA CUDA Toolkit. Параллельные алгоритмы настолько ускоряют вычисления, что позволяют переходить к решению уравнения (1) на очень больших сетках, в частности 2048×2048 и более узлов в поперечном направлении. Это необходимо при численном анализе решения (1) с сильными градиентами показателя преломления.

Вариации $n_1(\mathbf{r}, z)$, вызванные атмосферной турбулентностью, задаются в виде дискретного набора слоёв:

$$n_1(\mathbf{r}, z) = \sum_{m=1}^{M} \Big[\delta(z - z_m) \int\limits_{z_{m-1}}^{z_m} n_1(\mathbf{r}, z')dz'\Big] = -k_0^{-1} \sum_{m=1}^{M} [\delta(z - z_m)\varphi_m(\mathbf{r})], \tag{3}$$

где δ — дельта-функция; $\{z_m\}$ — координаты каждого экрана ($m = 1, \ldots, M$ — число слоёв). Фазовые возмущения $\varphi_m(\mathbf{r})$ в каждом слое полагаются статистически независимыми однородными и изотропными случайно-неоднородными двумерными полями со степенной спектральной плотностью

$$\Phi_n(\kappa) = \frac{0{,}033 C_n^2}{(\kappa_L^2 + \kappa^2)^{11/6}} \exp\Big(-\frac{\kappa^2}{\kappa_m^2}\Big), \tag{4}$$

где C_n — структурная характеристика турбулентности атмосферы; $\kappa_m = 2\pi/|\mathbf{r}|$ — пространственная частота; $\kappa_L \ll \kappa \ll \kappa_m$, $\kappa_L = 2\pi/L_0$, $\kappa_m = 2\pi/l_0$ (L_0 — внешний масштаб, l_0 — внутренний масштаб турбулентности). Решение неоднородного уравнения (1) с начальным условием (2) является стохастической задачей и может быть получено методом статистических испытаний путём усреднения большого числа частных решений для различных реализаций фазовых неоднородностей $\varphi_m(\mathbf{r})$. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены одно из сгенерированных на компьютере выборочных двумерных распределений фазы $\varphi_m(x, y)$ и соответствующая ему картина флуктуаций интенсивности $I(x, y) = U(x, y)U^*(x, y)$.

Известно, что турбулентные неоднородности атмосферы могут обладать очень широким диапазоном масштабов — более четырёх порядков ($L_0/l_0 > 10000$) [2]. Для их корректного представления при компьютерном моделировании требуются двумерные расчётные сетки очень больших размеров и быстродействующие алгоритмы-генераторы, включая базовый программный генератор некоррелированных псевдослучайных чисел. Этот генератор должен также иметь как можно больший период вследствие того, что стандартные библиотечные линейные конгруэнтные датчики имеют период порядка длины машинного слова, т. е. $\sim 2^{31} - 1$, чего явно недостаточно для матриц большой протяжённости. Генераторы из библиотек Intel MKL и NVIDIA CUDA Toolkit обладают этими свойствами: большим периодом, превосходными статистикой и быстродействием. Лучший на сегодняшний день (SIMD-ориентированный) быстрый генератор псевдослучайных чисел "Mersenne Twister" SFMT19937 (Intel MKL), имеющий период $\sim 2^{19937}$, был выбран в качестве основного.

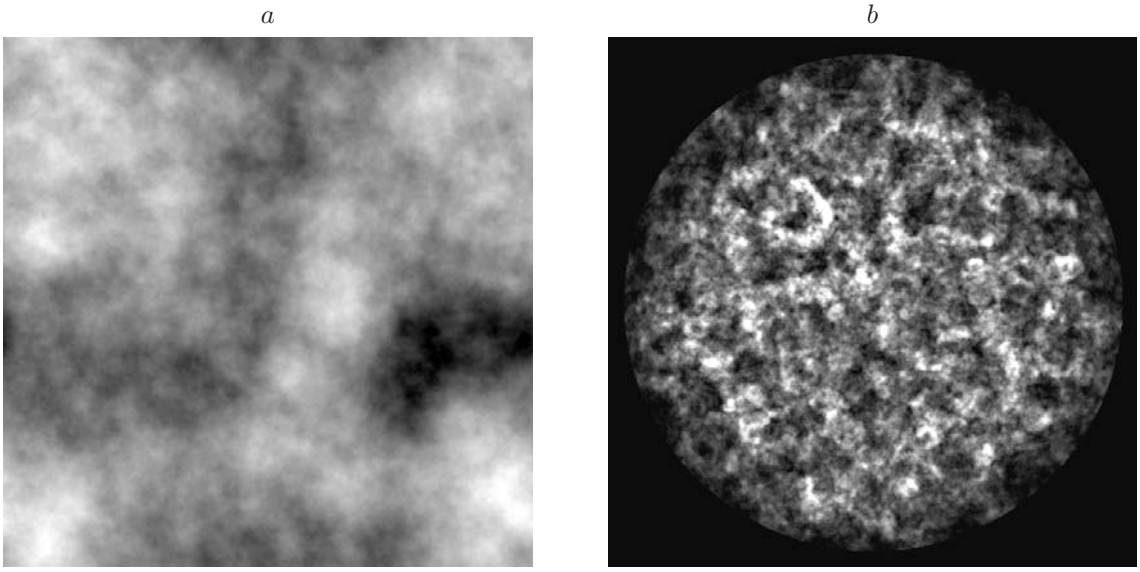

Рис. 1. Результаты численного решения уравнения (1): *a* — случайная фаза со степенной спектральной плотностью ($L_0/l_0 = 1000$); *b* — флуктуации интенсивности

В программе-генераторе случайных процессов и полей с заданными корреляционными свойствами использовался спектральный метод [4] с применением параллельных версий двумерных алгоритмов БПФ DFTi и CUFFT. Для описания временны́х изменений поля показателя преломления, вызванных ветровым движением, разработан алгоритм моделирования «бесконечной» динамической случайно-неоднородной среды, основанный на гипотезе «замороженности» турбулентности. Каждый турбулентный слой (фазовый экран) в этой модели имеет независимую от других поперечную к трассе скорость движения v_m:

$$\varphi_m(r, t_2) = k_0 \int\limits_{z_m}^{z_{m+1}} n_1(r - v_m(t_2 - t_1), z, t_1)dz. \tag{5}$$

Ввиду того что дискретное преобразование Фурье имеет свойство периодичности (фаза на границах прямоугольной сетки непрерывна), созданная с помощью алгоритма БПФ динамическая модель обладает свойством цикличности и при задании во время движения сдвига, кратного расстоянию между узлами сетки, становится бесконечно непрерывной.

Компьютерная модель адаптивной системы формирования изображений и фокусировки лазерных пучков. Задачи формирования изображения с помощью адаптивной оптики и фокусировки лазерных пучков адаптивными системами, несмотря на очевидное различие, имеют много общего при их моделировании на компьютере (рис. 2).

Слоистая модель атмосферной трассы из-за изменчивости параметров атмосферы с высотой h содержит вертикальные профили основных атмосферных параметров (температуры, давления, направления и скорости ветра, коэффициентов поглощения) и структурной характеристики турбулентности $C_n(h)$ в виде аналитической модели Hufnagel — Valley [2]. Отношение масштаба когерентности оптической волны

$$r_0 = \left\{0{,}423 k_0^2 \sec(\zeta) \int\limits_0^L C_n^2[h(z)]dz\right\}^{-3/5}, \tag{6}$$

прошедшей расстояние L по наклонной трассе с зенитным углом ζ в турбулентной атмосфере, к диаметру приёмной апертуры $2a_0$ определяет величину турбулентных искажений. Упрощённая схема модели адаптивного формирования изображений и пучков приведена

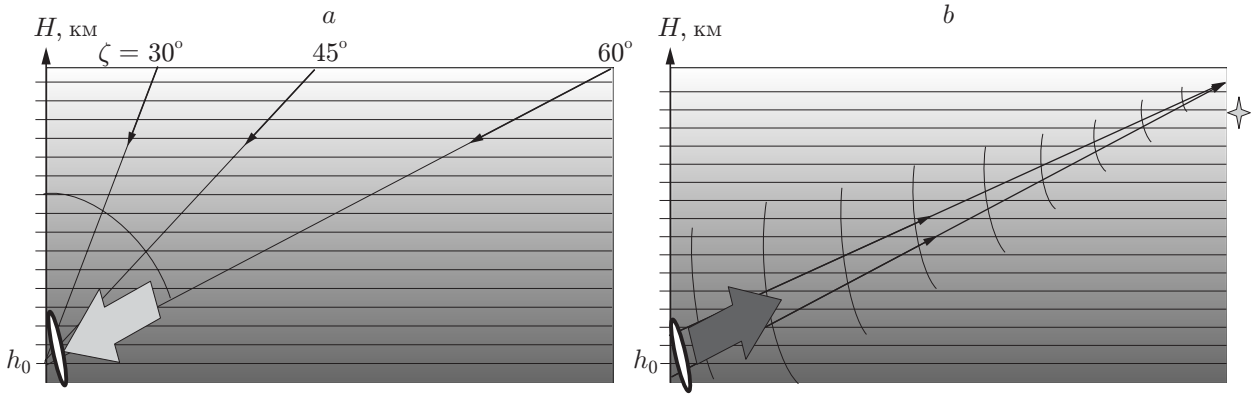

Рис. 2. Схема моделирования атмосферы: *a* — для формирования изображения; *b* — для фокусировки пучка

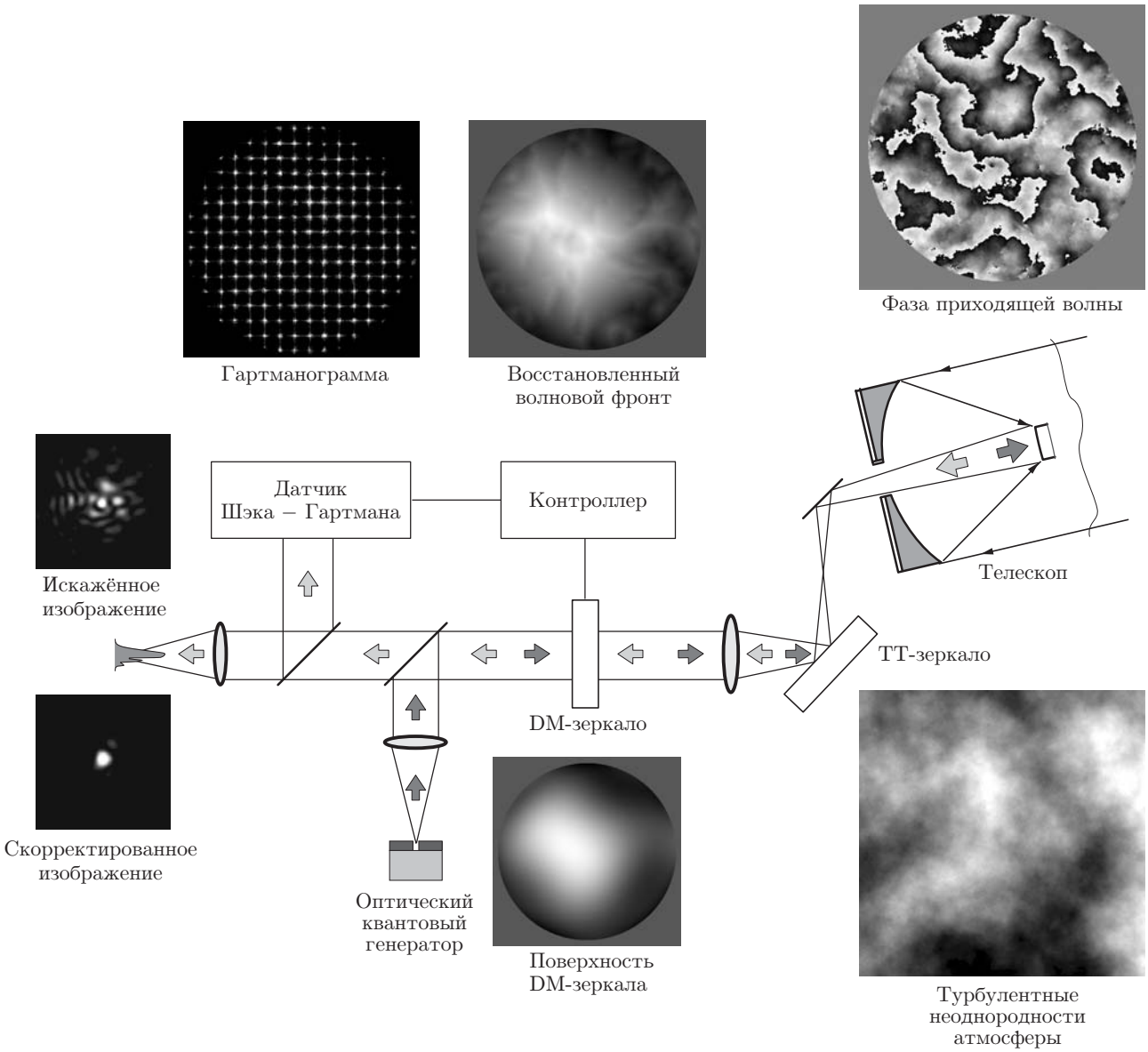

Рис. 3. Упрощённая схема моделирования оптического тракта приёмопередающей адаптивной системы

на рис. 3. Оптическая волна, прошедшая через атмосферу, попадает в приёмную часть оптической системы, затем проходит (справа налево) управляемое по наклонам зеркало TT (Tip-Tilt) и деформируемое зеркало DM (Deformable Mirror), после чего формирует изображение. Плоский волновой фронт (ВФ) от точечного источника, искажённый турбулентными неоднородностями атмосферы, даёт короткоэкспозиционное изображение. При включённом контуре адаптивной системы часть излучения отводится в датчик Шэка — Гартмана, который измеряет ВФ и подаёт сигналы в контроллер, управляющий гибким DM-зеркалом. Искривление зеркала в противофазе с пришедшей волной приводит к компенсации искажений и корректировке изображения.

Аналогично работает система формирования (фокусировки) лазерных пучков, основанная на принципе «взаимности» [2, 4]. Фазовые предыскажения с обратным знаком, внесённые DM-зеркалом в ВФ лазера оптического квантового генератора, приводят к кор-

рекции фронта на начальном участке трассы распространения пучка, что позволяет существенно уменьшить размер фокального пятна в атмосфере.

Моделирование датчика ВФ и деформируемого зеркала, как и численное решение уравнения распространения (1), требует серьёзных вычислительных затрат, которые минимизируются при переходе к параллельному программированию. Технология пакетной обработки данных CUDA Batched Processing [7] идеально подходит, например, для реализации параллельного алгоритма обработки гартманограммы и нахождения координат центроидов. Исключительную роль она играет также в корреляционном датчике Шэка — Гартмана при измерении ВФ от протяжённых объектов [8], в котором двумерная взаимная корреляция большого числа субматриц рассчитывается одновременно с использованием параллельного двумерного преобразования Фурье. Совместно с процедурой параллельного умножения вектора измерений на матрицу реконструкции эти быстродействующие алгоритмы дают возможность проводить вычисления в реальном времени, что важно как для моделирования, так и для реализации датчиков ВФ в экспериментальном оборудовании.

Все вышеперечисленные методы и алгоритмы были положены в основу создания программного обеспечения для компьютерного моделирования адаптивной оптики в атмосферных лазерных системах. Разработанный пакет прикладных программ позволяет достоверно оценивать эффективность применения АОС в атмосфере.

Результаты моделирования. Качество изображения, формируемого на наклонной трассе в атмосфере, зависит от зенитного угла ζ (или его аналога — угла возвышения трассы $\theta = 90° - \zeta$), так как волна от внеатмосферного источника проходит оптические пути различной протяжённости. Очевидно, что чем больше зенитный угол ζ (меньше θ), тем хуже принимаемое изображение, что подтверждается многочисленными экспериментами. Для оценки эффективности работы АОС при коррекции изображения на наклонных трассах проведены расчёты зависимости числа Штреля (рис. 4) от угла возвышения телескопа диаметром 3,6 м, расположенного на высоте $h_0 = 3$ км, и модели атмосферы HV21 [2]. Рассматривались различные варианты реализации АОС: кривая *1* — коррекция отсутствует (АОС выключена); *2* — датчик ВФ (геометрия 16×16) и DM-зеркало (15 полиномов Цернике) имеют низкое разрешение; *3* — датчик ВФ имеет высокое разрешение (геометрия 64×64), а DM-зеркало — низкое разрешение; *4* — датчик ВФ и DM-зеркало (35 полиномов Цернике) имеют высокое разрешение. Кривая *5* соответствует «идеальной» АОС, в которой используется операция сшивки модельной фазы ВФ по модулю 2π, что является «теоретическим пределом» для датчика ВФ, а функция DM-зеркала заменяется оператором смены знака ВФ. Из рисунка видно, что по мере увеличения угла возвышения

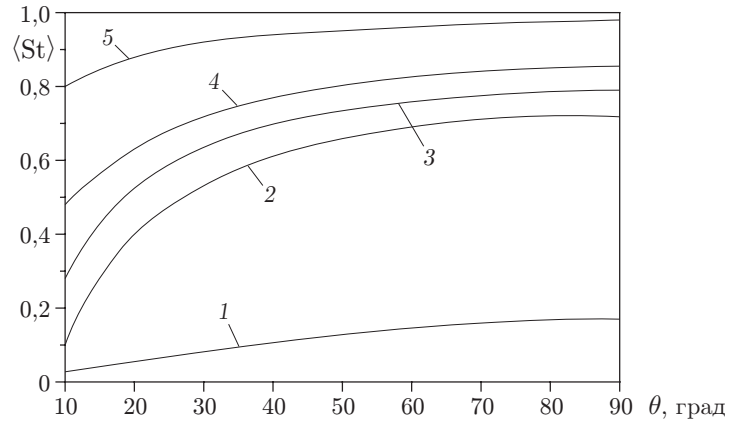

Рис. 4. Зависимость числа Штреля $\langle \mathrm{St} \rangle$ от угла возвышения $\theta = 90° - \zeta$ для различных вариантов АОС

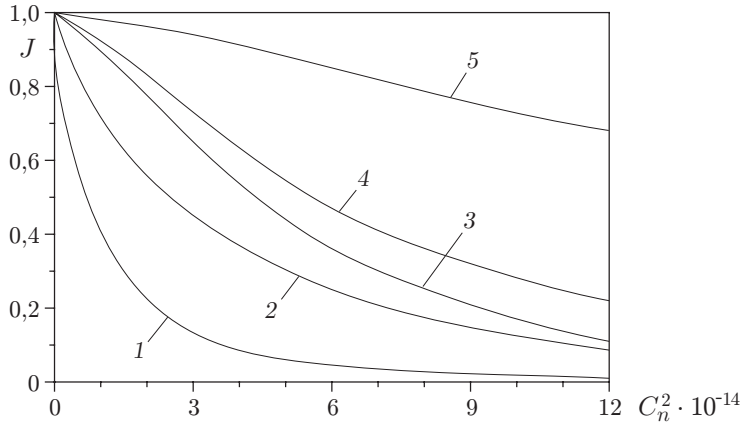

Рис. 5. Зависимость эффективности фокусировки пучка на наклонной трассе от интенсивности турбулентности для различных вариантов АОС

θ число Штреля для кривых *2–4* возрастает в несколько раз, превышая при этом максимальное значение (кривая *1*). Таким образом, изображение, формируемое АОС, даже в самых плохих условиях лучше, чем без коррекции. Однако реальная АОС имеет низкую эффективность при малом угле возвышения ($\theta < 15°$, $2a_0/r_0 > 20$). Эти выводы хорошо согласуются с результатами экспериментальной работы [9].

Эффективность фокусировки лазерного пучка оптической системой можно характеризовать параметром, аналогичным числу Штреля и рассчитываемым как отношение доли энергии в дифракционном кружке (PIB — Power in the Bucket) к этому же значению, но в идеальной оптической системе $J = J_{\text{PIB}}/J^0_{\text{PIB}}$, где

$$J_{\text{PIB}} = \int\limits_0^R \langle U^2(r)\rangle dr \Big/ \int\limits_0^\infty \langle U^2(r)\rangle dr.$$

На рис. 5 приведены графики зависимости параметра фокусировки J от интенсивности турбулентности $C_n(0)$ в начале трассы для модели вертикального профиля атмосферы HV, длины трассы 2 км, радиуса супергауссова пучка 15 см, длины волны 1,06 мкм и угла возвышения трассы $\theta = 14°$. Номера кривых соответствуют вариантам АОС, аналогично рис. 4. В отсутствие коррекции (кривая *1*) параметр J падает практически до нуля при $C_n^2 = 10^{-13}$. Адаптивная система, как и в случае формирования изображения, увеличивает критерий фокусировки в несколько раз. Однако даже АОС высокого разрешения (кривая *4*) значительно уступает идеальной АОС (кривая *5*), что отражает существенно большее влияние ошибок аппроксимации ВФ адаптивной системой при фокусировке в протяжённой среде по сравнению с оптической системой формирования изображения.

Заключение. Использование алгоритмов с параллельной архитектурой в качестве основы для компьютерного моделирования адаптивной оптики позволило создать эффективный пакет прикладных программ при исследовании широкого круга атмосферно-оптических задач. Параллельные алгоритмы дают многократное ускорение при численном решении уравнений волновой оптики, требующем больших вычислительных затрат. С их помощью можно моделировать практически в реальном времени элементы адаптивной оптической системы, такие как датчики волнового фронта, деформируемые зеркала и другие, и отрабатывать алгоритмы их функционирования. Существенное увеличение быстродействия позволяет также применять при моделировании более реалистичные модели атмо-

сферы, а значит, получать более достоверные оценки, необходимые для проектирования будущих систем лазерной и адаптивной оптики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fleck J., Morris J., Feit M.** Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere // Appl. Phys. A. 1976. **10**, N 2. P. 129–141.
2. **Распространение** лазерного пучка в атмосфере /Под ред. Д. Стробена; Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 414 с.
3. **Коняев П. А.** Численное исследование тепловых искажений лазерных пучков в атмосфере: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук /Томск. гос. универ. Томск, 1984. 16 с.
4. **Зуев В. Е., Коняев П. А., Лукин В. П.** Минимизация атмосферных искажений оптических волн методами адаптивной оптики // Изв. вузов. Сер. Физика. 1985. **28**, № 11. С. 6–12.
5. **Лукин В. П., Канев Ф. Ю., Коняев П. А., Фортес Б. В.** Численная модель адаптивной оптической системы // Оптика атмосферы и океана. 1995. **8**, № 3. С. 409–417.
6. **Truong T., Bouchez A., Dekany R. et al.** Real-time wavefront control for the PALM-3000 high order adaptive optics system // Proc. SPIE. 2008. **7015**. 70153I.
7. **Коняев П. А., Тартаковский Е. А., Филимонов Г. А.** Численное моделирование распространения оптических волн с использованием технологий параллельного программирования // Оптика атмосферы и океана. 2011. **49**, № 5. С. 359–365.
8. **Lukin V. P., Botygina N. N., Emaleev O. N., Konyaev P. A.** Wavefront sensors for adaptive optical systems // Measur. Sci. Rev. 2010. **10**, N 3. P. 102–107.
9. **Vorontsov M., Riker J., Carhart G. et al.** Deep turbulence effects compensation experiments with a cascaded adaptive optics system using a 3.63m telescope// Appl. Opt. 2009. **48**, N 1. P. 47–57.

Поступила в редакцию 16 ноября 2011 г.