

**И.В. Давлетшина, С.С. Чесноков**

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ТЕПЛОвого САМОВОЗДЕЙСТВИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ СИМПЛЕКС-МЕТОДА**

Работа посвящена численному анализу стохастических задач атмосферной оптики. На примере простых моделей атмосферной турбулентности исследуется влияние пульсаций скорости ветра и крупномасштабных флуктуаций показателя преломления на энергетические характеристики световых пучков. Демонстрируются возможности динамической компенсации нелинейных и турбулентных искажений пучков на основе симплекс-метода.

Проблема улучшения характеристик лазерных пучков, распространяющихся в атмосфере, представляет большой интерес для современной оптики и ее приложений, поскольку высокие потенциальные возможности информационных, технологических и измерительных систем в значительной степени ограничиваются условиями распространения световых волн в реальных материальных средах. Наиболее сильно влияние атмосферы проявляется в протяженных оптических каналах, например на приземных горизонтальных и наклонных трассах. В этом случае распространение мощного излучения сопровождается не только нестационарным тепловым самовоздействием в условиях пульсаций скорости ветра, но и рефракцией на крупномасштабных флуктуациях показателя преломления.

Методика численного моделирования нестационарной ветровой рефракции в настоящее время хорошо разработана. В [1–3] предложена модель пульсаций скорости ветра, позволяющая наиболее просто описать воздействие крупномасштабных турбулентных вихрей на распространение пучков на приземных трассах. В [4–5] турбулентное уширение пучка и его тепловые искажения рассмотрены как аддитивные эффекты. Вместе с тем ясно, что пульсации скорости ветра и флуктуации показателя преломления оказывают совместное влияние на структуру теплового канала, наводимого пучком, поэтому для достоверного прогнозирования искажений пучка эти эффекты необходимо учитывать одновременно. Отметим, что вплоть до настоящего времени отсутствуют работы, в которых такой учет был бы проведен достаточно последовательно.

Отметим также, что долгое время вопрос о развитии алгоритмов адаптивного управления световыми пучками оставался в стороне от теоретических исследований. Положенный первоначально в основу работы систем апертурного зондирования градиентный метод вплоть до настоящего времени остается фактически единственным алгоритмом, применяемым на практике. Однако в реальных системах атмосферной оптики, работающих при наличии флуктуаций параметров излучения и среды, применимость градиентного метода ограничена [6]. В основном это связано с большими ошибками при измерении в реальном времени градиентов оптимизируемого функционала. Поэтому представляет интерес рассмотрение неградиентных методов нелинейной оптимизации. Одним из них является симплекс-метод, применимость которого к задачам адаптивной фокусировки лазерного излучения в нелинейных средах показана в предшествующих работах авторов [7–12].

Настоящая статья посвящена дальнейшему развитию симплекс-метода и анализу его эффективности в стохастических задачах атмосферной оптики с учетом переходных процессов в системе «пучок – среда», возникающих как при вариациях управляемого волнового фронта, так и при смене реализаций скорости ветра и крупномасштабных флуктуаций показателя преломления.

### **1. Математическая модель распространения световых пучков в нелинейной турбулентной среде**

Описание распространения световых пучков в атмосфере обычно основывается на квазиоптическом приближении теории дифракции, которое рассматривается совместно с матери-

альным уравнением для возмущений температуры среды. В безразмерном виде соответствующая система уравнений записывается как

$$2i \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + \tilde{n} E + R_0 T E; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} = |E|^2, \quad (2)$$

где  $E$  – комплексная амплитуда электрического поля в световой волне;  $T$  – возмущения температуры, наведенные пучком;  $\tilde{n}$  – случайное поле показателя преломления атмосферы;  $V_x, V_y$  – проекции скорости ветра на координатные оси  $OX, OY$ . В уравнениях (1), (2) использована стандартная нормировка переменных [13], параметр нелинейности

$$R_0 = \frac{2k^2 a_0^3 \alpha I_0}{n_0 \rho C_p V_0} \frac{\partial n}{\partial T} \quad (3)$$

определен по средней скорости ветра  $V_0$ .

Будем рассматривать распространение лазерного пучка на горизонтальной трассе над однородной подстилающей поверхностью. При этом случайное поле скорости ветра  $\mathbf{V}(x, y, z, t)$  статистически стационарно. Поскольку в приземном слое атмосферы вертикальная компонента скорости  $V_y$  мала по сравнению с горизонтальной  $V_x$  [14], можно полагать, что средняя скорость параллельна поверхности. Как известно, внешний масштаб турбулентности  $L_0$  по порядку величины сравним с высотой  $h_0$  над подстилающей поверхностью, а максимум спектра флуктуаций вертикальной компоненты скорости лежит в области частот  $\nu$  из интервала  $0,1 V_0/h_0 \leq \nu \leq V_0/h_0$ . Таким образом, характерный период пульсаций скорости  $T_V = 1/\nu$  можно определить как  $T_V \approx h\tau_V/a_0$ , где  $\tau_V = a_0/V_0$  – конвективное время.

При реализации изложенной модели на ЭВМ скорости  $\mathbf{V}$  на фазовых экранах представляются в виде векторной суммы регулярной составляющей  $\mathbf{V}_0$ , параллельной оси  $OX$ , и флуктуационных компонент  $\delta V_x, \delta V_y$ , имеющих нормальный центрированный закон распределения с дисперсией  $\sigma_V^2$ . Пульсации скорости ветра имитируются скачкообразной сменой реализаций с характерным временем  $T_V$ .

Флуктуации показателя преломления  $\tilde{n}$  моделируются на основе модального подхода [15–19], в соответствии с которым мгновенные реализации случайного фазового поля  $\varphi(\mathbf{p}, t)$  на экране представляются в виде суперпозиции ортогональных полиномов Цернике  $Z_j(\rho/R, \vartheta)$  со случайными коэффициентами  $\alpha_j(t)$ :

$$\varphi(\rho, \vartheta, t) = \sum_{j=1}^J \alpha_j(t) Z_j(\rho/R, \vartheta), \quad (4)$$

где  $\mathbf{p} = \{x, y\} = \{\rho \cos \vartheta, \rho \sin \vartheta\}$ ;  $R$  – радиус фазового экрана.

Основываясь на оценках [15], нетрудно показать, что для достоверного моделирования случайных блужданий и турбулентного уширения пучка достаточно ограничиться первыми пятью полиномами Цернике (за вычетом поршневой моды), т.е. наклонами, дефокусировкой и астигматизмами волнового фронта. Развита в [17, 19] методика позволяет получить временные спектры и автокорреляционные функции случайных весовых коэффициентов  $\alpha_j(t)$  и построить динамическую модель крупномасштабных фазовых искажений для произвольного спектра атмосферной турбулентности. В настоящей работе использована кармановская модель турбулентности с пространственным спектром вида

$$\Phi_n(\kappa) = 0,033 C_n^2 (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6}, \quad (5)$$

где  $C_n^2$  – структурная постоянная флуктуаций показателя преломления;  $\kappa$  – пространственная частота;  $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ .

В соответствии с принципом модального управления волновой фронт  $U(x, y, t)$  пучка на передающей апертуре (в плоскости  $z=0$ ) задается как суперпозиция заданных оптических

мод. Исходя из структуры фазовых искажений пучка в режиме ветровой рефракции,  $U(x, y, t)$  естественно выбрать в виде

$$U(x, y, t) = \theta_x(t)x + \theta_y(t)y + S_x(t)\frac{x^2}{2} + S_y(t)\frac{y^2}{2} + S_{xy}(t)2xy. \quad (6)$$

Оценку качества управления будем производить по критерию фокусировки

$$J_f(t) = \frac{1}{P_0} \iint \sigma(x, y) |E(x, y, z_0)|^2 dx dy, \quad (7)$$

где  $P_0$  – полная мощность в пучке;  $\sigma$  – апертурная функция, описывающая область локализации светового поля на мишени;  $z_0$  – длина трассы. В нестационарных задачах удобно также использовать критерий относительной эффективности управления  $\eta(T) = W(T)/W_0(T)$ ,

где

$$W(T) = \int_0^T J_f(t) dt \quad (8)$$

– энергия управляемого пучка, попадающая в апертуру  $\sigma$  за время  $T$ ;  $W_0$  – та же величина в отсутствие управления.

В данной работе исследуется распространение гауссовского пучка начального радиуса  $a_0 = 10$  см на высоте  $h_0 = 1$  м над подстилающей поверхностью. Остальные параметры численного эксперимента таковы: длина волны инфракрасного излучения  $\lambda = 10,6$  мкм, средняя скорость ветра  $V_0 = 1$  м/с, длина трассы  $z_0 = 3000$  м, что составляет  $0,5 ka_0^2$ , радиус приемной апертуры  $\sigma(x, y)$  в плоскости наблюдения  $r_i = 2a_d$ , где  $a_d$  – радиус дифракционно-ограниченного фокального пятна в вакууме.

## 2. Нелинейные искажения световых пучков при наличии пульсаций скорости ветра и флуктуаций показателя преломления

Для анализа влияния атмосферных неоднородностей на распространение светового пучка в условиях ветровой рефракции естественно рассмотреть вначале наиболее простую модель турбулентности. Будем полагать, что основной вклад крупномасштабных атмосферных вихрей проявляется в пульсациях скорости ветра. Поэтому начнем рассмотрение распространения пучка в среде с пульсациями скорости ветра на трассе, которое описывается уравнениями (1), (2)

в пренебрежении естественными флуктуациями показателя преломления ( $\tilde{n} \approx 0$ ). Положим для определенности среднее время заморозности пульсаций равным  $T = 5 \tau_V$ , что для выбранных параметров численного эксперимента составляет 0,5 с. Такая частая смена реализаций среды позволит определить основные закономерности распространения пучка и управления его волновым фронтом при сравнительно небольших вычислительных затратах.

В режиме пульсаций скорости ветра переходные процессы в системе «пучок–среда» возникают не только при начальном включении лазерного излучения, но и при смене состояний среды. Это вызвано тем, что изменение скорости ветра приводит к значительным вариациям эффективной нелинейности среды на трассе распространения и, как следствие, к флуктуациям параметров поля на объекте фокусировки.

На рис. 1,а приведены характерные зависимости критерия фокусировки от времени. Соответствующие зависимости эффективной ширины пучка и смещения его центра тяжести от времени представлены для данной реализации на рис. 1,б,в.

Наличие пульсаций скорости ветра на трассе распространения приводит к более сильному уширению пучка и к случайным блужданиям его в плоскости наблюдения (для сравнения штриховыми линиями на рис. 1 показано изменение параметров пучка в регулярной среде). Такое поведение пучка является следствием существенно неравномерного прогрева среды.

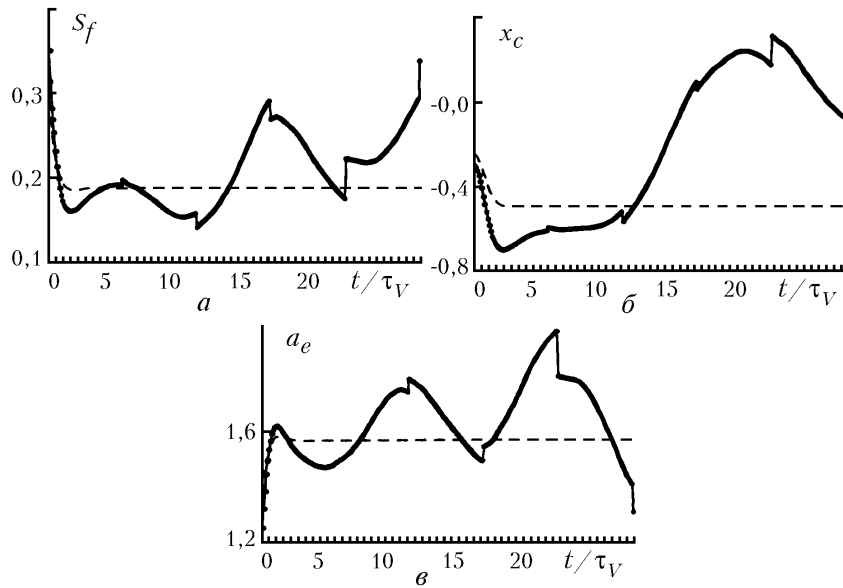


Рис. 1. Характерные зависимости критерия фокусировки ( $a$ ), смещения энергетического центра пучка ( $b$ ), энергетического радиуса ( $e$ ) от времени. Сплошные линии – среда с пульсациями скорости, штриховые – регулярная среда. Условия распространения:  $R_0 = -20$ ,  $\sigma_V = 0,3V_0$ ,  $T_V = 5\tau_V$

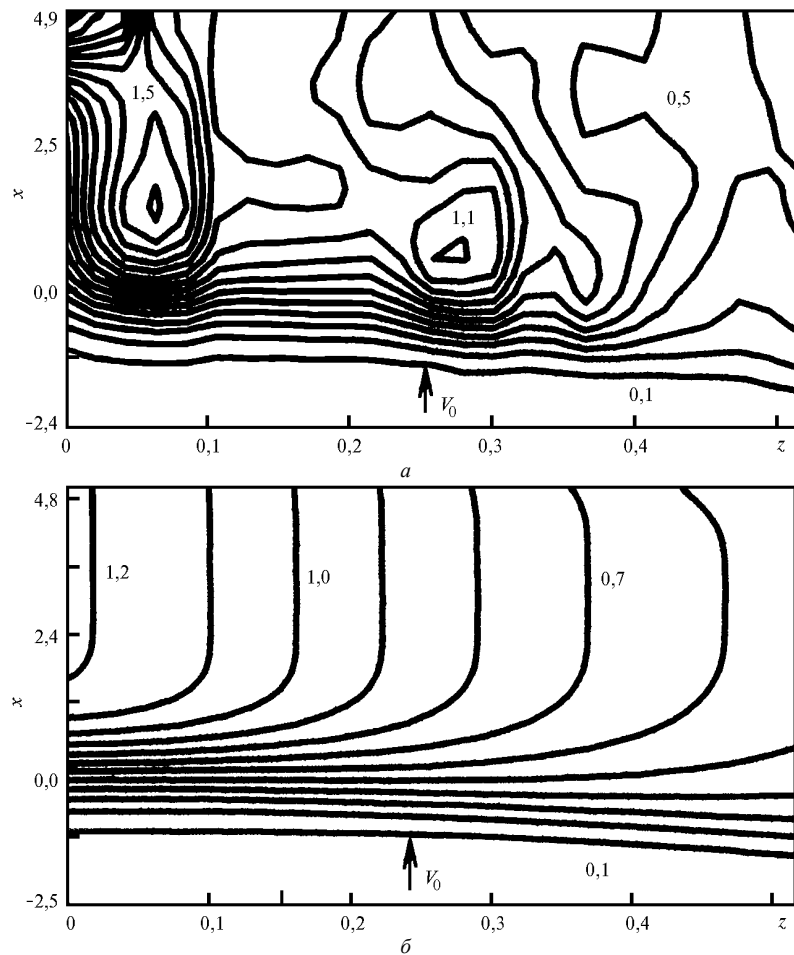


Рис. 2. Линии равной температуры на плоскости  $XZ$  в момент времени  $t = 7\tau_V$ :  $a$  – при наличии пульсаций скорости ветра ( $R_0 = -20$ ,  $\sigma_V = 0,3V_0$ ,  $T_V = 5\tau_V$ );  $b$  – в регулярной среде. Сечения температурного поля даны с шагом 0,1

На рис. 3 представлены зависимости средних значений и стандартных отклонений критерия фокусировки, смещения энергетического центра пучка и его энергетического радиуса от дисперсии флуктуаций скорости ветра. Эти данные получены путем численного моделирования распространения коллимированного пучка в течение времени  $T = 25\tau_V$  и усреднения по 100 реализациям. Видно, что при увеличении  $\sigma_V$  происходит некоторый рост средних значений критерия фокусировки и энергетического радиуса пучка.

В реальной атмосфере крупномасштабные вихри приводят не только к пульсациям скорости ветра, но и к флуктуациям показателя преломления. Поэтому представляет интерес исследование совместного влияния этих факторов на статистические характеристики пучка и целевой функции (критерия фокусировки). Данная задача описывается системой уравнений (1), (2) с учетом всех членов.

В табл. 1 представлены средние значения критерия фокусировки, смещения энергетического центра пучка и его энергетического радиуса в зависимости от  $C_n^2$  и дисперсии флуктуаций скорости ветра при  $R_0 = -20$ . Данные получены путем численного моделирования распространения коллимированного пучка в течение времени  $T = 25\tau_V$  и усреднены по 100 реализациям.

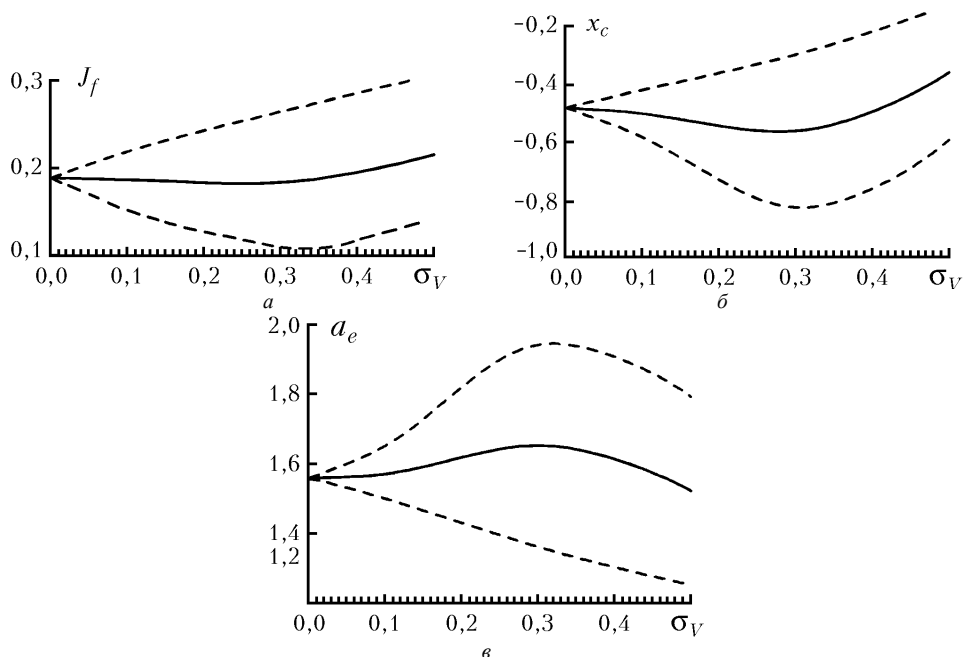


Рис. 3. Влияние дисперсии флуктуаций скорости ветра на средние значения критерия фокусировки (а), смещения энергетического центра пучка (б), энергетического радиуса (е). Штриховыми линиями отмечены стандартные отклонения данных характеристик. Условия распространения:  $R_0 = -20$ ,  $T = 25\tau_V$ ,  $T_V = 5\tau_V$

Проведенный анализ показывает, что совместное влияние флуктуаций показателя преломления и пульсаций скорости ветра приводит в среднем к более равномерному прогреву среды, а значит, к уменьшению случайных блужданий пучка. При этом основной вклад в уширение пучка, по-видимому, дают пульсации скорости ветра. Тем не менее в отдельных случаях крупномасштабные флуктуации показателя преломления могут усилить переходный процесс при смене состояний среды, что приводит к резкому уменьшению критерия фокусировки. Для предотвращения потери устойчивости управления в этих условиях необходимо провести более полный анализ особенностей адаптивной коррекции и разработать алгоритм, малочувствительный к резким изменениям состояний среды.

### 3. Компенсация турбулентных искажений мощных световых пучков на основе симплекс-метода

Анализ эффективности динамической компенсации искажений мощных световых пучков в атмосфере снова начнем с простейшей модели, учитывающей пульсации скорости ветра в пре-

небрежении флуктуациями показателя преломления. Исходя из характера нелинейных искажений пучка в среде с пульсациями скорости ветра управляемый волновой фронт естественно было бы выбрать в виде (6). Однако при большом числе управляемых координат трудно провести априорный анализ траектории поиска оптимума, весьма полезный, в частности, для определения начальной конфигурации симплекса. Это особенно важно при наличии переходных процессов, поскольку первые шаги поиска должны идти в правильном направлении (например, пучок должен начать фокусироваться, а не наоборот). В пятимерном пространстве определить это направление затруднительно. Поэтому имеет смысл попытаться уменьшить число управляемых координат, что одновременно позволит также увеличить реальное быстродействие адаптивной системы.

Таблица 1

Средние значения критерия фокусировки, смещения энергетического центра пучка и энергетического радиуса.  
Условия распространения:  $R_0 = -20$ ,  $T = 25\tau_V$ ,  $T_V = 5\tau_V$

$\sigma_V/V_0$	$C_n^2$ , см <sup>-2/3</sup>	$\langle J_f \rangle$	$\langle x_c \rangle/a_0$	$\langle a_e \rangle/a_0$
0	0	0,188	-0,48	1,56
0,1	0	0,186±0,032	-0,50±0,08	1,57±0,08
0,1	$6,4 \cdot 10^{-15}$	0,188±0,033	-0,48±0,08	1,57±0,09
0,1	$6,4 \cdot 10^{-14}$	0,193±0,034	-0,43±0,10	1,58±0,09
0,1	$6,4 \cdot 10^{-13}$	0,209±0,038	-0,27±0,16	1,62±0,11
0,3	0	0,183±0,081	-0,56±0,26	1,65±0,29
0,3	$6,4 \cdot 10^{-15}$	0,184±0,075	-0,52±0,25	1,65±0,28
0,3	$6,4 \cdot 10^{-14}$	0,185±0,079	-0,49±0,25	1,68±0,29
0,3	$6,4 \cdot 10^{-13}$	0,195±0,077	-0,34±0,28	1,70±0,28
0,5	0	0,215±0,091	-0,36±0,23	1,52±0,27
0,5	$6,4 \cdot 10^{-15}$	0,210±0,093	-0,36±0,26	1,73±0,43
0,5	$6,4 \cdot 10^{-14}$	0,210±0,093	-0,33±0,26	1,74±0,42
0,5	$6,4 \cdot 10^{-13}$	0,210±0,092	-0,21±0,31	1,75±0,41

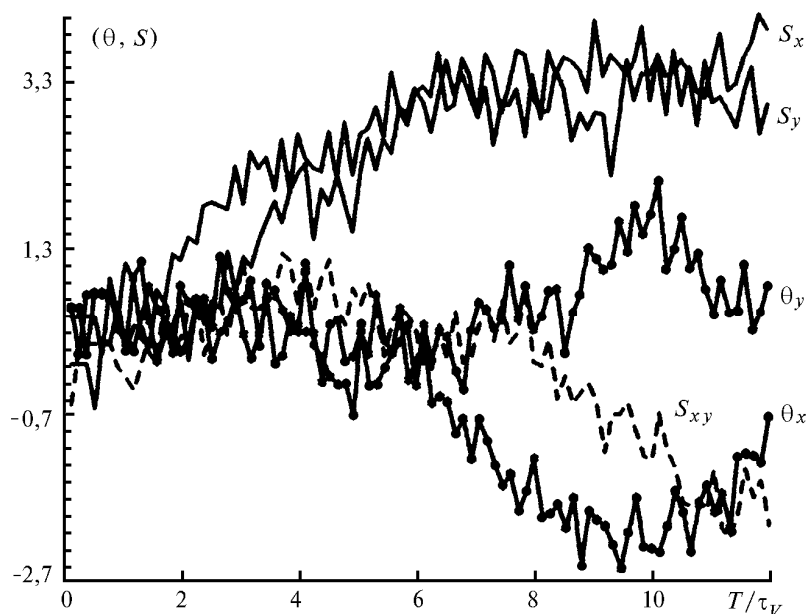


Рис. 4. Динамика управляемых координат при компенсации ветровой рефракции по симплекс-методу.  
Условия распространения:  $R_0 = -12$ ,  $T = 12\tau_V$ ,  $T_V = 2\tau_V$ ,  $\sigma_V = 0,3V_0$

На рис. 4 представлена в качестве примера динамика управляемых координат во время управления в базе (6) в одной из реализаций динамической коррекции ветровой рефракции в турбулентной атмосфере. Видно, что адаптивная коррекция по симплекс-методу вызывает принудительное сканирование пучком за счет скачкообразного изменения управляемых координат, особенно наклонов. Учитывая, что при наличии случайных пульсаций скорости дефо-

кусировка пучка практически осесимметрична, уменьшение числа управляемых переменных естественно провести, введя комбинированную моду  $(x^2/2 + y^2/2)$ , т.е. положить

$$U(x, y, t) = \theta_x(t)x + \theta_y(t)y + S(t)(x^2/2 + y^2/2) + S_{xy}(t)2xy. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что переменная  $S_{xy}$  быстро убывает со временем, в некоторых задачах ее можно исключить. При этом волновой фронт будет иметь вид

$$U(x, y, t) = \theta_x(t)x + \theta_y(t)y + S(t)(x^2/2 + y^2/2). \quad (10)$$

В последующих численных экспериментах управление пучком рассматривалось в течение промежутка времени  $T = 12\tau_V$  с момента включения лазерного источника. Эффективность поиска оценивалась по параметру  $\eta(T)$ . Результаты численного моделирования показали, что оптимальный размер симплекса  $L$  может быть оценен, исходя из соображений, приведенных в [9, 12].

Отметим, что обычно используемая модификация алгоритма симплексного поиска [9] не может обеспечить устойчивости управления в условиях пульсаций из-за того, что в ней предусмотрено целенаправленное движение симплекса к «дрейфующей» цели. Поэтому представляется разумным применить поиск с переменной стратегией [11], который можно разделить на два этапа. Первый этап – это управление на начальной стадии прогрева среды (в течение времени порядка  $2\tau_V$ ) с использованием алгоритма с принудительным отражением вершин [20], что позволяет избежать «зацикливания» симплекса. Затем, на втором этапе, когда преимущественное значение приобретают случайные блуждания пучка и переходные процессы, возникающие при смене состояний среды, следует применить алгоритм со свободным отражением вершин. Его основное правило заключается в отражении наихудшей вершины симплекса без каких-либо дополнительных условий. Как будет показано ниже, такая организация управления действительно позволяет скомпенсировать случайные блуждания пучка и избежать неустойчивых режимов поиска.

В рассматриваемой задаче положим время замороженности пульсаций скорости ветра  $T_V = 2\tau_V$ . Хотя данный режим представляется малореалистичным, он позволит детально исследовать устойчивость алгоритма симплекс-метода в стохастических задачах при приемлемых вычислительных затратах. В табл. 2 проиллюстрирована эффективность управления на основе симплекс-метода в базисах (6), (9)–(10). Представленные в таблице значения  $\eta(T)$  получены при одних и тех же реализациях распределения пульсаций скорости ветра по трассе и усреднены по 20 реализациям. Можно видеть, что эффективность управления в разных базисах определяется такими факторами, как параметр нелинейности и дисперсия скорости ветра. Например, в случае слабой нелинейности  $\langle |R| \rangle \leq 10$  трехмерный базис (10) обнаруживает значительные преимущества при  $0,1 \leq \sigma_V/V_0 \leq 0,5$ . При умеренной нелинейности ( $20 \leq \langle |R| \rangle \leq 30$ ) эффективность управления в базисах (6) и (9) примерно одинакова. Таким образом, при рассмотренных условиях четырехмерный базис (9) является достаточным и нет необходимости использовать пятимерный базис (6).

Таблица 2

Относительная эффективность управления $\eta(12\tau_V)$ в зависимости от параметра нелинейности и дисперсии флуктуаций скорости ветра									
Базис управления и число переменных	$ R_0 $								
	10			20			30		
	$\sigma_V/V_0$								
	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
(6) $N = 5$	1,34	1,37	1,33	1,49	1,45	1,38	1,55	1,56	1,61
(9) $N = 4$	1,38	1,51	1,46	1,50	1,52	1,47	1,46	1,58	1,68
(10) $N = 3$	1,54	1,58	1,56	1,49	1,49	1,50	1,51	1,61	1,65

Интересно отметить, что средние значения параметра относительной эффективности управления  $\eta(T)$  увеличиваются с ростом как нелинейности среды, так и дисперсии флуктуаций скорости ветра. По-видимому, как и в случае регулярной среды, это происходит из-за более равномерного прогрева канала распространения путем перемешивания температуры за счет сканирования управляемого пучка. Этот эффект влияет также на статистические характеристики пучка и оптимизируемой целевой функции. В условиях пульсаций скорости ветра в диа-

пазоне  $0,1 \leq \sigma_V/V_0 \leq 0,5$  алгоритм симплекс-поиска устойчив, причем при увеличении  $\sigma_V/V_0$  стандартное отклонение критерия фокусировки практически не возрастает. Это, по-видимому, объясняется тем, что применяемый здесь алгоритм обеспечивает равномерное сканирование пучком во взаимно перпендикулярных плоскостях. В результате среднее смещение центра тяжести пучка не превышает  $a_0/2$  в широком диапазоне изменения параметра нелинейности  $20 \leq \langle |R| \rangle \leq 30$ , причем для значений  $20 \leq \langle |R| \rangle \leq 30$  управление на основе симплекс-метода позволяет повысить энергию  $W_0(T)$  за время управления в среднем в 1,5 раза по сравнению со случаем распространения как коллимированного, так и сфокусированного пучков.

Рассмотрим теперь задачу об управлении пучком, распространяющимся в случайно-неоднородной нелинейной среде, описываемой уравнениями (1), (2) с учетом всех членов. Эффективность коррекции будем оценивать, как и ранее, по нормированной суммарной световой энергии, попадающей в приемную апертуру за время управления  $T$ . Вначале необходимо определить, как влияет размерность базиса управления на его эффективность. Результаты численного моделирования по управлению фазой светового пучка в такой задаче представлены в табл. 3.

Значения относительной эффективности управления, вычисленные на интервале  $T = 12\tau_V$ , усреднены по 10 реализациям. Видно, что наиболее эффективно управление в трехмерном базисе, хотя пятимерный базис позволяет достичь меньшего разброса энергии, попадающей в приемную апертуру. В целом можно утверждать, что фазовая коррекция на основе симплекс-метода эффективна в широком диапазоне параметра  $C_n^2$ . Это подтверждается результатами численного моделирования, приведенными в табл. 4.

Таблица 3

Средние величины и стандартные отклонения параметра эффективности управления  $\eta(12\tau_V)$ .  
Условия распространения:  $R_0 = -20$ ,  $\sigma_V/V_0 = 0,3$ ,  $T_V = 2\tau_V$

Параметр	Базис управления			
	(6) $N = 5$	(9) $N = 4$	(10) $N = 3$	$U = 0, N = 0$
$\sigma_\eta$	0,34	0,39	0,46	0,46
$\langle \eta \rangle$	1,60	1,57	1,68	1,00

Таблица 4

Средние значения критерия фокусировки, смещения энергетического центра пучка и энергетического радиуса при управлении на основе алгоритма симплексного поиска.  
Условия распространения:  $R_0 = -20$ ,  $T = 25\tau_V$ ,  $T_V = 5\tau_V$

$\sigma_V/V_0$	$C_n^2, \text{ см}^{-2/3}$	$\langle J_f \rangle$	$\langle x_c \rangle/a_0$	$\langle a_e \rangle/a_0$
0,1	$6,4 \cdot 10^{-14}$	$0,33 \pm 0,06$	$-0,30 \pm 0,15$	$1,36 \pm 0,05$
0,1	$6,4 \cdot 10^{-13}$	$0,32 \pm 0,02$	$-0,27 \pm 0,12$	$1,37 \pm 0,05$
0,1	$6,4 \cdot 10^{-12}$	$0,31 \pm 0,02$	$-0,27 \pm 0,16$	$1,36 \pm 0,05$
0,3	$6,4 \cdot 10^{-14}$	$0,33 \pm 0,02$	$-0,27 \pm 0,15$	$1,36 \pm 0,05$
0,3	$6,4 \cdot 10^{-13}$	$0,32 \pm 0,03$	$-0,25 \pm 0,16$	$1,35 \pm 0,04$
0,3	$6,4 \cdot 10^{-12}$	$0,33 \pm 0,03$	$-0,21 \pm 0,12$	$1,32 \pm 0,04$
0,5	$6,4 \cdot 10^{-14}$	$0,32 \pm 0,02$	$-0,33 \pm 0,12$	$1,50 \pm 0,03$
0,5	$6,4 \cdot 10^{-13}$	$0,31 \pm 0,02$	$-0,33 \pm 0,11$	$1,51 \pm 0,04$
0,5	$6,4 \cdot 10^{-12}$	$0,32 \pm 0,03$	$-0,30 \pm 0,10$	$1,53 \pm 0,03$

## Выводы

Проведенный в работе анализ распространения мощных световых пучков в турбулентной атмосфере позволяет сделать следующие выводы:

1. Пульсации скорости ветра на трассе, вызванные крупномасштабными атмосферными вихрями, приводят, в среднем, к улучшению условий распространения по сравнению со случаем регулярной среды. Несмотря на увеличение среднеквадратичного радиуса пучка с ростом интенсивности флуктуаций скорости ветра, наблюдаемое при этом уменьшение среднего смещения его центра тяжести приводит, в среднем, к повышению концентрации светового поля на мишени. Так, при возрастании стандартного отклонения скорости ветра от нуля до половины



среднего значения скорости усредненный по времени и реализациям критерий фокусировки увеличивается на 10 – 15%. Одновременно с этим стандартные отклонения критерия фокусировки, смещения центра тяжести пучка и его радиуса увеличиваются примерно в 2 – 3 раза.

2. В широком диапазоне значений структурной постоянной  $C_n^2$  крупномасштабные флуктуации показателя преломления, существующие одновременно с пульсациями скорости ветра, практически не приводят к изменению средней концентрации светового поля на мишени, вызывая лишь незначительное (до 10%) увеличение статистического разброса критерия фокусировки и несколько более заметное (на 10–60%) увеличение дисперсии смещения центра тяжести пучка и его среднеквадратичного радиуса.

3. Адаптивная компенсация искажений мощных световых пучков в турбулентной атмосфере на основе симплекс-метода с оптимизированными параметрами позволяет увеличить среднюю световую энергию, попадающую на мишень, по сравнению со случаем неуправляемого (коллимированного или сфокусированного) пучка в среднем на 70 – 80%. Этот эффект достигается в основном за счет уменьшения при управлении среднего смещения пучка (на 20 – 60%) и его энергетического радиуса (на 15 – 30%). Одновременно при управлении наблюдается существенное снижение дисперсий флуктуаций энергетических параметров пучка.

Настоящая работа выполнена при поддержке Международного научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований (грант NCR300).

1. Егоров К. Д., Чесноков С. С. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. N 6. С. 1269–1273.
2. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. N 5. С. 590–591.
3. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 6. С. 598–603.
4. Fleck J. A., Morris J. R., Feit M. D. // Appl. Phys. 1976. V. 10. N 2. P. 129–160.
5. Jahl Raphael Z. // Appl. Optics. 1990. V. 29. N 21. P. 3088–3095.
6. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
7. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 12. С. 1249–1253.
8. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 4. С. 413–417.
9. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 12. С. 1252–1257.
10. Малафеева И. В., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 12. С. 1490–1499.
11. Chesnokov S. S., Davletshina I. V. // Proceedings of SPIE. 1994. V. 2312. P. 305–315.
12. Chesnokov S. S., Davletshina I. V. // Appl. Optics. 1995. V. 34. N 36. P. 8375–8381.
13. Ахманов С. А., Воронцов М. А., Кандидов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. N 1. С. 1–37.
14. Ламли Дж., Пановский Г. А. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
15. No11 R. J. // JOSA. 1976. V. 66. P. 207–211.
16. Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 12. С. 1294–1297.
17. Войцехович В. В. Временные характеристики адаптивных астрономических систем. М., 1988. (Препринт/МКИ, N 873).
18. Fortes B. V., Lukin V. P. // Proceedings of SPIE. 1992. V. 1668. P. 477–488.
19. Chesnokov S. S., Davletshina I. V., Koriabin A. V. et al. // Technical Digest of 8th Laser Optics Conference. St. Petersburg, 1995. V. 1. P. 22–23.
20. Дамбраускас А. П. Симплексный поиск. М.: Энергия, 1979. 168 с.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
19 марта 1996 г.

**I. V. Davletshina, S. S. Chesnokov. Dynamic Compensation of Light Beam Thermal Blooming in Turbulent Atmosphere by Simplex Method.**

The paper is devoted to numerical analysis of stochastic problems of atmospheric optics. The effect of wind velocity pulsation and large-scale refractive index fluctuations on energetic parameters of light beams is studied based on use of simple models of atmospheric turbulence. The feasibilities of dynamic compensation of light beam nonlinear and turbulent distortions by the simplex method are demonstrated.