

Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, В.П. Лукин

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ УГЛОВ НАКЛОНА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРОШЕДШЕГО ТУРБУЛЕНТНУЮ АТМОСФЕРУ

Сообщается об исследовании эффективности коррекции искажений, обусловленных атмосферной турбулентностью, при формировании изображения лазерного пучка с помощью адаптивной оптической системы с замкнутым контуром управления общими и локальными наклонами волнового фронта при слежении за угловыми смещениями полного изображения и его квадрантов. В частности, показано, что использование в качестве корректора изображения составного зеркала, управляемого только по углам наклона, улучшает качество формируемого изображения в условиях сильной турбулентности.

Для коррекции изображения, искажения которого обусловлены атмосферной турбулентностью, в ранее опубликованной работе [1] авторами была предложена адаптивная оптическая система с разомкнутым контуром управления общими наклонами волнового фронта. Основными недостатками таких систем являются высокие требования к линейности и точности измерительных устройств, невозможность компенсировать ошибки управления, связанные с неполным учетом внешних возмущений и нестабильностью (дрейфом) характеристик управляемого зеркала. От этих недостатков свободна система с замкнутым контуром управления.

В настоящей статье сообщается об исследовании эффективности коррекции изображения адаптивной оптической системой с замкнутым контуром управления общими и локальными наклонами волнового фронта при слежении за угловыми смещениями полного изображения и его квадрантов.

#### Описание экспериментальной установки

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучение гелий-неонового лазера 1 типа ЛГН-222 коллимировалось двухкомпонентной линзовой системой 2. Исследовалось распространение лазерных пучков с параметрами Френеля  $\Omega_H = 18,2$  и  $1,44$  на атмосферной трассе 3 протяженностью  $L$ , равной 100 м на высоте 10 м над подстилающей поверхностью. Измерения проводились при параметрах Френеля входной апертуры  $\Omega_i = 3; 0,75$  и  $0,4$ . Здесь и далее в работе используются следующие обозначения:  $\Omega_H = k a_0^2/L$ ,  $\Omega_i = k a_i^2/L$ , где  $k$  – волновое число излучения;  $a_0$  – радиус пучка по уровню  $e^{-1}$  интенсивности на оси;  $a_i$  – эффективный радиус входной апертуры в гауссовом представлении функции пропускания линзы. Максимальный радиус входной апертуры определяется размером управляемого по углам наклона во взаимно перпендикулярных плоскостях биморфного дефлектора 5 [2]. Чувствительность дефлектора в полосе частот  $(0 \div 190)$  Гц в горизонтальной плоскости равна  $1,08 \cdot 10^{-6}$  рад/В, в вертикальной плоскости –  $1,26 \cdot 10^{-6}$  рад/В. Частоты механического резонанса в горизонтальной плоскости –  $f_1 = 260$  Гц (добротность резонансного контура  $Q$  равна 2,5),  $f_2 = 400$  Гц ( $Q = 5,8$ ); в вертикальной плоскости –  $f_1 = 280$  Гц ( $Q = 2,8$ ),  $f_2 = 400$  Гц ( $Q = 6$ ).

Управление локальными наклонами волнового фронта осуществляется 4-элементным составным зеркалом 7. В качестве толкателей используются пьезокерамические полые цилиндры из материала марки ЦТС-19 с разделенными на 4 части электродами на внешней и внутренней поверхностях цилиндра. На электроды подаются управляющие напряжения таким образом, чтобы обеспечить наклоны отдельного зеркального элемента относительно взаимно ортогональных осей. В конструкции составного зеркала предусмотрена механическая юстировка элементов. Изучение влияния конструктивных особенностей на динамические характе-

ристики составного зеркала позволило создать конструкцию с оптимальным распределением подвижных масс и оптимальной жесткостью соединения элементов конструкции. Частота первого механического резонанса отдельного элемента зеркала в горизонтальной плоскости равна 4,0 кГц ( $Q = 7$ ), в вертикальной плоскости – 3,9 кГц ( $Q = 9$ ). В полосе пропускания ( $0 \div 2$ ) кГц чувствительность при наклонах относительно горизонтальной оси составляет  $2,83 \cdot 10^{-7}$  рад/В, относительно вертикальной оси –  $2,46 \cdot 10^{-7}$  рад/В.

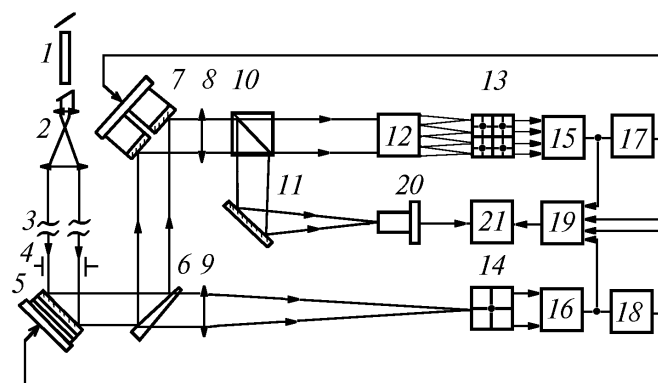


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – гелий-неоновый лазер типа ЛН-222; 2 – коллиматор; 3 – атмосферная трасса длиной 100 м; 4 – ирисовая диафрагма переменного радиуса; 5 – биморфный дефлектор; 6 – светоделительный оптический клин; 7 – 4-элементное управляемое зеркало; 8, 9 – объективы с фокусным расстоянием 1600 мм; 10 – светоделительный кубик; 11 – поворотное зеркало; 12 – делитель изображения на квадранты; 13, 14 – матрица фотоприемников и отдельный квадрантный координатно-чувствительный фотоприемник типа ФД-19 КК; 15, 16 – 2-координатные измерители угловых смещений энергетического центра тяжести изображения; 17, 18 – блоки управления; 19 – 8-канальный гистограмматор; 20 – телевизионная камера КТ-8; 21 – персональный компьютер

Изображение формируется объективами 8, 9 с фокусным расстоянием  $F = 1600$  мм. В фокальной плоскости объективов 8, 9 расположены квадрантный координатно-чувствительный фотоприемник 14 типа ФД-19 КК и матрица 13 из четырех фотоприемников ФД-19 КК. В качестве делителя изображения 12 используются две пары плоскопараллельных пластин, расположенных под углом друг к другу. Взаимная ориентация пар пластин обеспечивает необходимое смещение квадрантов изображения в соответствии с положением приемников в матрице 13.

На основе сравнения распределения светового потока по квадрантам фотоприемников в измерительных блоках 15, 16 [1] вырабатываются сигналы, пропорциональные угловым смещениям энергетического центра тяжести (ЭЦТ) полного изображения и его квадрантов. Сигналы поступают на входы блоков управления 17, 18, обрабатываются по закону управления и подаются на пьезоэлектрические приводы адаптивных зеркал 5, 7.

Для анализа случайных сигналов с блоков управления и измерителей угловых смещений изображения используется 8-канальный гистограмматор на базе персонального компьютера IBM PC AT 21.

Скорректированное изображение с помощью светоделительного кубика 10 и зеркала 11 переносится в плоскость регистрации. Для воспроизведения изображения на видеоконтурном устройстве и ввода в IBM – совместимый персональный компьютер 21 со специализированной видеоплатой сопряжения – используется модифицированная телевизионная камера 20 типа КТ-8 на основе ПЗС-матрицы К1200ЦМ7Б. Поле зрения телевизионной камеры –  $670 \times 930$  мкм, количество элементов разложения –  $256 \times 256$ , число уровней квантования видеосигнала – 64.

### Следящая система

При выборе структуры системы автоматического регулирования для компенсации угловых смещений изображения учитывалось, что для выделения полезного сигнала на фоне помехи, когда оба сигнала на входе системы представляют собой некоррелированные стационарные случайные процессы, оптимальной является придаточная функция, соответствующая сглаживающему устройству типа интегратора [3].

Структурная схема следящей системы приведена на рис. 2, где I – следящая система компенсации углового смещения изображения при управлении общими наклонами волнового фронта; II – 4-канальная следящая система компенсации углового смещения изображения при управлении локальными наклонами волнового фронта;  $\alpha$ ,  $\alpha_i$  – угловые смещения ЭЦТ полного изображения и его  $i$ -го сектора, обусловленные атмосферной турбулентностью ( $i = 1, 2, 3, 4$ );  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{0i}$  – угловые смещения ЭЦТ полного изображения и его  $i$ -го сектора под действием управляемых зеркал;  $\varepsilon = \alpha - \alpha_0$ ;  $\varepsilon_i = \alpha_i - \alpha_{0i}$  – ошибки регулирования; 1 – измеритель угловых смещений ЭЦТ изображения на основе квадрантного фотоприемника; 2 – интегратор на базе операционного усилителя; 3 – высоковольтный усилитель [4]; 4 – управляемое зеркало.

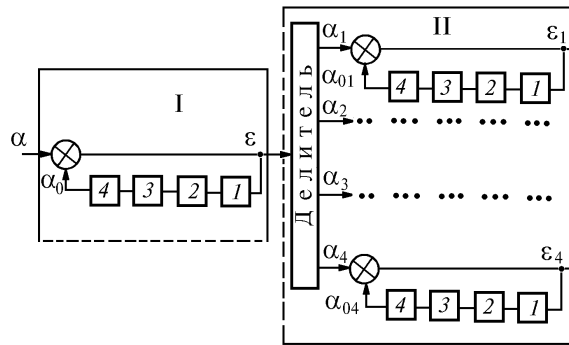


Рис. 2. Структурная схема автоматического регулирования

Расчет параметров системы осуществлялся исходя из требований по запасу устойчивости, обеспечивающему хорошее затухание и малую колебательность переходного процесса. В основу расчета положены частотные методы с использованием логарифмических частотных характеристик. Для достижения желаемого качества переходного процесса, а также учитывая то, что на вход следящей системы поступает случайный сигнал, спектр которого заранее не известен, предусмотрена возможность изменения коэффициента усиления системы в режиме настройки.

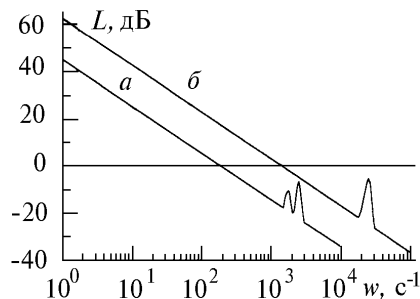


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика следящей системы:  $a$  – при управлении общими наклонами волнового фронта;  $b$  – при управлении локальными наклонами волнового фронта

На рис. 3 представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики  $L(\omega)$  разомкнутой цепи системы компенсации угловых смещений изображения по оси  $Y$  при управлении общими  $a$  и локальными  $b$  наклонами волнового фронта (параметр Френеля излучателя  $\Omega_H = 18,2$ ; параметр Френеля входной апертуры  $\Omega_i = 3,0$ ):

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{\sqrt{(1 + k_2^2 T_n^2 \omega^2) [(1 - \omega^2 T_2^2)^2 + \omega^2 T_1^2]}}, \quad (1)$$

где  $k_1$  – крутизна позиционной характеристики измерителя;  $k_2$  – коэффициент усиления операционного усилителя;  $T_n$  – постоянная времени интегратора;  $k_3$  – коэффициент усиления высоковольтного усилителя;  $k_4 = 2 S$ , где  $S$  – крутизна статистической характеристики управляемого

го зеркала;  $T_2, T_1$  – постоянные времени управляемого зеркала;  $T_2 = 1/\omega_p$ ,  $\omega_p$  – резонансная частота;  $T_2/T_1 = Q$  – добротность резонансного контура управляемого зеркала.

Параметры	$\Omega_n = 18,2, \Omega_t = 3,0$				$\Omega_n = 18,2, \Omega_t = 0,75$			
	Управление наклонами							
	общими		локальными		общими		локальными	
	по X	по Y	по X	по Y	по X	по Y	по X	по Y
$K$	171	178	1977	1328	188	213	1610	823
$\omega_1, \text{с}^{-1}$	5,4	5,6	62,5	42	5,9	6,7	51	26
$\omega_c, \text{с}^{-1}$	171	178	1977	1328	188	213	1610	823
$L(\omega_p)$	-8,1	-7,4	-5,2	-6,3	-7,3	-5,9	-7	-10

По виду логарифмической амплитудно-частотной характеристики можно оценить качество процесса слежения. В таблице приведены параметры следящей системы при различных параметрах Френеля приемной апертуры: общий коэффициент усиления разомкнутой цепи  $K$ ; граница полосы частот  $\omega_1$  входного сигнала, воспроизводимого следящей системой практически без искажений ( $\varepsilon_{\max}/\alpha_{\max} = 1/[1 + |W(\omega_1)|] = 3\%$ , где  $W(\omega_1)$  – передаточная функция разомкнутой цепи;  $L(\omega_1) = 30$  дБ); частота среза  $\omega_c$  ( $L(\omega_c) = 0$ ), характеризующая быстроту затухания переходного процесса; запас устойчивости по амплитуде на резонансной частоте  $L(\omega_p)$ .

Попытка улучшить точностные и динамические характеристики системы за счет введения корректирующих устройств при заданных параметрах управляющих зеркал не дала существенного улучшения качества слежения, и усложнение системы дополнительными элементами было признано нецелесообразным.

#### Методика и результаты измерений

Измерения проводились в трех режимах работы следящей системы: при управлении общими наклонами волнового фронта излучения, при управлении локальными наклонами и при одновременном управлении общими и локальными наклонами волнового фронта. Анализировалась средняя дифракционная картина в фокальной плоскости приемной линзы.

Турбулентное состояние атмосферы на трассе распространения излучения характеризовалось структурной постоянной показателя преломления  $C_n^2$ , полученной из измерений дисперсии дрожания изображения в фокальной плоскости линзы  $s_i^2$ . Для вычисления  $C_n^2$  использовалось выражение [5]:

$$\sigma_i^2 = \pi^2 0,033 F^2 L C_n^2 \Gamma(1/6) (a_i^2/2)^{-1/6} [1 + S(\Omega_t)], \quad (2)$$

$$S(\Omega_t) = \int_0^1 \text{Re}[(1 + i \Omega_t^{-1} \xi)^{-1/6}] d\xi.$$

Значения функции  $S(\Omega_t)$  находились численным интегрированием (методом трапеций) с относительной погрешностью  $10^{-4}$ . Чтобы обеспечить работу измерителя угловых смещений изображения в линейном участке позиционной характеристики, при измерении  $C_n^2$  диаметр входной апертуры уменьшался до 8 мм ( $\Omega_t = 0,40$ ). Измерения проводились при  $\Omega_n = 18,2$ . Дисперсия оценивалась из гистограммы. Частота дискретизации при наборе гистограммы – 870 Гц, длина реализации 5 мин.

При получении средней дифракционной картины использовались некоррелированные выборки. Частота выборки – 0,25 Гц. Объем выборки – 200 видеок кадров. Время экспозиции видеок кадра – 20 мс.

В процессе накопления средней дифракционной картины осуществлялся набор гистограмм сигналов управления и рассогласования для контроля относительных ошибок управления:

$$\varepsilon' = \frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma_{\alpha_0}} \text{ – в режиме управления общими наклонами волнового фронта;}$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma_{\varepsilon_i}}{\sigma_{\alpha_{0i}}} \text{ – в режиме управления локальными наклонами;}$$

$$\varepsilon''' = \frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma_{\alpha_0}}, \quad \varepsilon''_i = \frac{\sigma_{\varepsilon_i}}{\sigma_{\alpha_{0i}}} - \text{при одновременном управлении общими и локальными наклонами волнового фронта.}$$

нового фронта.

Качество коррекции изображения оценивалось по распределению энергии в средней дифракционной картине. Рассчитывалась доля энергии  $E$  в круге фиксированного радиуса.

На рис. 4 приведены зависимости этой величины от радиуса средней дифракционной картины при различной интенсивности турбулентности и различных параметрах Френеля излучающей и приемной апертуры. При  $\Omega_{II} > \Omega_I$  в условиях значительных турбулентных искажений изображения (рис. 4, *а*) управление общими наклонами волнового фронта приводит к более высокой степени концентрации энергии в центре изображения, однако вся энергия оказывается сосредоточенной в круге большего радиуса, чем при управлении локальными наклонами. Последнее может связано с тем, что ошибка слежения при управлении общими наклонами волнового фронта больше, чем при управлении локальными наклонами.

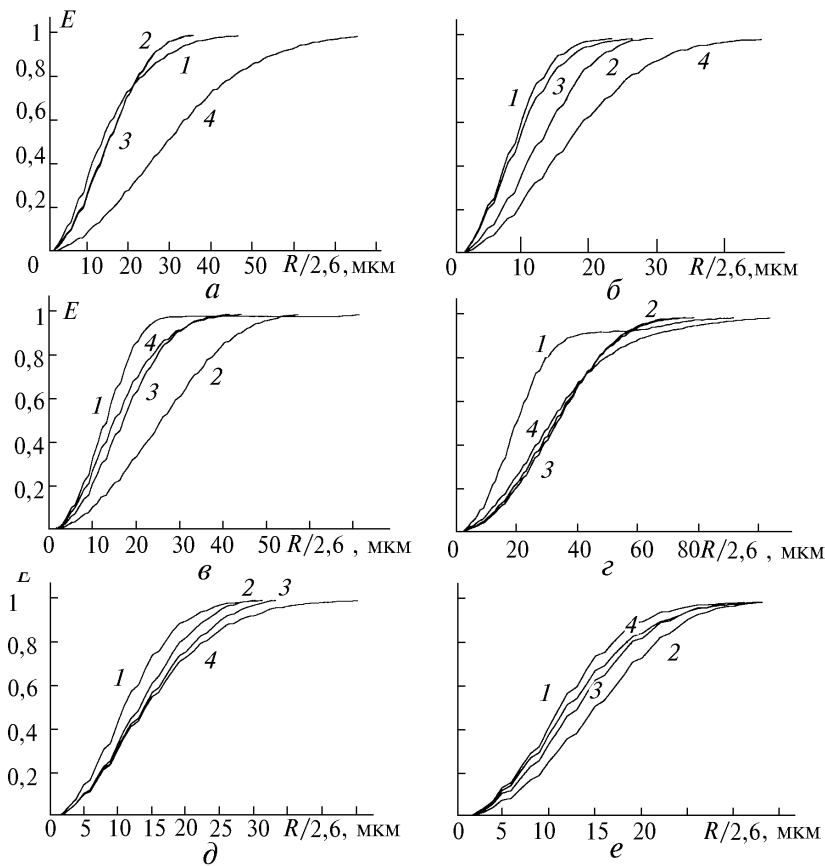


Рис. 4. Эффективность коррекции изображения. Кривая 1 соответствует распределению энергии в средней дифракционной картине при управлении общими наклонами, 2 – при управлении только локальными наклонами, 3 – при одновременном управлении общими и локальными наклонами, 4 – в отсутствие коррекции. *а* –  $\Omega_{II}=18,2$ ;  $\Omega_I=3$ ;  $C_n^2=3,6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$ ;  $\varepsilon'=8,2\%$ ;  $\langle \varepsilon'_i \rangle=1,0\%$ ;  $\varepsilon''=5,6\%$ ;  $\langle \varepsilon''_i \rangle=1,3\%$ . *б* –  $\Omega_{II}=18,2$ ;  $\Omega_I=3$ ;  $C_n^2=8,7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$ ;  $\varepsilon'=10,3\%$ ;  $\langle \varepsilon'_i \rangle=1,2\%$ ;  $\varepsilon''=6,3\%$ ;  $\langle \varepsilon''_i \rangle=1,9\%$ . *в* –  $\Omega_{II}=18,2$ ;  $\Omega_I=0,75$ ;  $C_n^2=8,7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$ ;  $\varepsilon'=12,1\%$ ;  $\langle \varepsilon'_i \rangle=4,3\%$ ;  $\varepsilon''=15,3\%$ ;  $\langle \varepsilon''_i \rangle=10\%$ . *г* –  $\Omega_{II}=18,2$ ;  $\Omega_I=0,75$ ;  $C_n^2=1,5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$ ;  $\varepsilon'=9,1\%$ ;  $\langle \varepsilon'_i \rangle=1,0\%$ ;  $\varepsilon''=6,0\%$ ;  $\langle \varepsilon''_i \rangle=1,5\%$ . *д* –  $\Omega_{II}=1,44$ ;  $\Omega_I=3$ ;  $\sigma_\alpha^2=8,3 \cdot 10^{-11}$ . *е* –  $\Omega_{II}=1,44$ ;  $\Omega_I=3$ ;  $\sigma_\alpha^2=4 \cdot 10^{-10}$

При меньшем искажающем влиянии турбулентности и тех же параметрах Френеля (рис. 4, *б*) управление общими наклонами волнового фронта более эффективно, чем управление только локальными и общими и локальными наклонами одновременно.

Уменьшение входной апертуры (рис. 4, *в*) приводит к ухудшению средней дифракционной картины при управлении локальными наклонами волнового фронта и при одновременном управлении общими и локальными наклонами.

При большей интенсивности турбулентности (рис. 4, *з*) управление локальными наклонами приводит к уменьшению размера средней дифракционной картины, но степень концентрации энергии картины ниже, чем в нескорректированном изображении.

При распространении в атмосфере узкого пучка, когда параметр Френеля излучающей апертуры  $\Omega_i = 1,44$ , а параметр Френеля приемной линзы  $\Omega_l = 3$ , управление локальными наклонами приводит к ухудшению средней дифракционной картины при слабой атмосферной турбулентности (рис. 4, *е*) и несколько улучшает распределение энергии в средней дифракционной картине при более сильной атмосферной турбулентности (рис. 4, *д*).

Управление общими наклонами волнового фронта во всех рассмотренных случаях приводит к улучшению изображения.

### Обсуждение результатов и выводы

Результаты исследования эффективности коррекции изображения, приведенные на рисунках 4, *а–г* соответствуют экспериментальной ситуации, при которой средний радиус пучка  $a$ , в плоскости приемной линзы значительно превышает радиус линзы  $a_l$ . Для коллимированного пучка [5]  $a_s = a_0 [1 + W_i^{-2} (1 + 4/3 a_0^2 \rho_n^2)^{1/2}]$ , где  $\rho_n$  – радиус когерентности в плоской волне. При  $a_s > a_l$  эффективный радиус зрачка  $a_m = [1/a_s^2 + 4/a_l^2]^{-1/2}$  в основном определяется радиусом приемной линзы. Тогда радиус средней дифракционной картины в фокальной плоскости линзы  $R_i \sim F/k [4/\rho_c^2 + 4/a_m^2]^{1/2}$  ( $\rho_c$  – радиус когерентности в пучке), так как в условиях эксперимента средний радиус изображения в приближении геометрической оптики много меньше среднего радиуса дифракционного изображения.

Составное зеркало, каждый элемент которого закреплен в центре и управляется по углу, в процессе управления расфазировано, поэтому минимальный размер изображения в фокальной плоскости приемной линзы ограничен дифракцией на отдельном элементе зеркала. Эффективность коррекции изображения при управлении локальными наклонами волнового фронта зависит от соотношения размера дифракционного изображения отдельной субапертуры и радиуса средней дифракционной картины, искажения которой обусловлены атмосферной турбулентностью. Управление локальными наклонами при выполнении неравенства  $2/a_m < [4\rho_c^2 + 4/a_l^2]^{1/2}$  или  $a_m > \rho_c (M - 1/M)^{1/2}$  ( $a_m$  – размер отдельного составного зеркала;  $M$  – количество элементов) приводит к улучшению изображения (рис. 4, *а*, рис. 4, *б*). В противном случае при управлении локальными наклонами средняя дифракционная картина ухудшается (рис. 4, *в*).

При распространении узкого лазерного пучка качество коррекции изображения за счет компенсации локальных наклонов улучшается, если размер изображения освещенных частей субапертур при несинфазном сложении в фокальной плоскости меньше радиуса средней дифракционной картины  $R_i \sim F/k [4/\rho_c^2 + 4/a_l^2 + 1/a_s^2]^{1/2}$ .

В условиях проведения измерений при атмосферной турбулентности, соответствующей значению  $q < 0,72$  ( $q = L/k\rho_n^2$ ), управление общими наклонами волнового фронта по выбранному критерию качества изображения эффективнее управления локальными наклонами.

Использование в качестве корректора изображения составного зеркала, управляемого только по углам наклона, улучшает изображение в условиях сильной турбулентности, но при слабой атмосферной турбулентности может привести к ухудшению средней дифракционной картины.

В заключение авторы выражают благодарность Л.Н. Лавриновой, П.А. Коняеву, А.П. Ростову за предоставление программных средств для обработки результатов измерений и А.П. Янкову за техническую помощь.

Работа частично финансировалась в рамках гранта N 94-03027-а Российского фонда фундаментальных исследований, а также гранта NY 1000 Международного научного фонда.

1. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Потанин С.Ф. // Оптика атмосферы. 1989. Т.2. N 6. С. 621–627.
2. Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П. // Приборы и техника эксперимента. 1988. N 5. С. 211–212.
3. Бессекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1970. 575 с.
4. Антошкин Л.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 12. С. 1320–1323.
5. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 270 с.

L.V. Antoshkin, N.N. Botygina, O.N. Emalejev, V.P. Lukin. **Efficiency of Image Correction under Compensation of Random Angles of Wave Front Slopes of the Radiation Passing through the Turbulent Atmosphere.**

An investigation is reported of efficient correction of distortions caused by atmospheric turbulence when laser beam imaging by means of adaptive optical system. The system includes a closed contour of monitoring general and local slopes of wave front when viewing angle bias of full image and its quadrants. In particular, the use of segmented mirror as the image corrector which controlling controlled only over angle slopes, is shown to improve the quality of the imaging under strong turbulence conditions.