

АДАПТИВНАЯ ОПТИКА

УДК 535.416.3

Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, В.П. Лукин, С.Ф. Потанин

АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Предлагается адаптивная оптическая система для компенсации случайных угловых смещений энергетического центра тяжести изображения, вызванных действием атмосферной турбулентности. Обоснован алгоритм функционирования системы. Проведен анализ адаптивной оптической системы. Значения величины, характеризующей эффективность коррекции изображения, сосредоточены в интервале от 4 до 12 в зависимости от частоты случайных смещений энергетического центра тяжести изображения.

Адаптивная оптическая система предназначена для коррекции изображения источника оптических волн, искажения которого обусловлены случайными наклонами волнового фронта излучения при распространении его в турбулентной атмосфере. Для компенсации смещений изображения, вызванных случайными наклонами волнового фронта, измеряются координаты линейных смещений энергетического центра тяжести изображения в фокальной плоскости оптической системы и вырабатываются сигналы управления, пропорциональные угловым смещениям, которые воздействуют на управляемое зеркало (дефлектор) таким образом, что поворотом зеркала компенсируются линейные смещения изображения в фокальной плоскости оптической системы.

1. Структурная схема установки

Для отработки алгоритма коррекции изображения была создана экспериментальная установка, структурная схема которой приведена на рис. 1. Установка состоит из передающей части, атмосферной трассы, измерительного канала и канала коррекции.

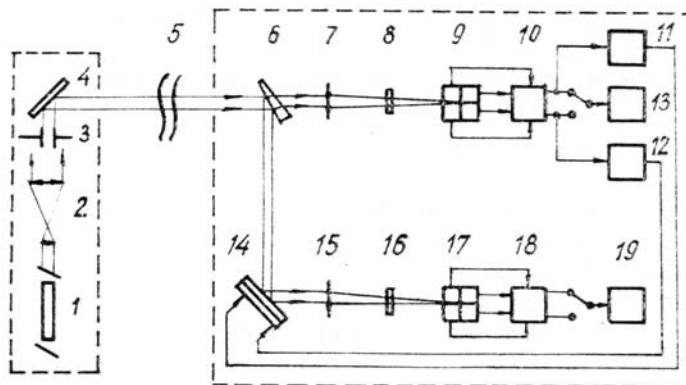


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 — лазер ЛГ-38; 2 — коллиматор; 3 — диафрагма; 4 — поворотное зеркало; 5 — атмосферная трасса; 6 — светоделительная пластина (клин); 7, 15 — объективы; 8, 16 — светофильтры; 9, 17 — координатные фотоприемники; 10, 18 — блоки обработки; 11, 12 — усилители; 13, 19 — анализаторы спектра

Передающая часть содержит источник 1 (лазер ЛГ-38), излучение которого формируется коллиматором 2 и диафрагмой 3.

Атмосферная трасса 5 протяженностью 100 м расположена между лабораторными корпусами ИОА СО АН СССР на высоте 10 м.

Лазерный пучок диаметром 1 см, пройдя атмосферную трассу, на входе приемной системы делится на два пучка. Излучение, прошедшее через оптический клин 6, попадает в измерительный канал. Пучок, отраженный от передней поверхности клина 6, направляется в канал коррекции.

В измерительном канале объективом 7 с фокусным расстоянием $f_{06} = 1600$ мм строится изображение источника. В фокальной плоскости объектива 7 расположен квадрантный координатно-чувствительный фотоприемник 9 типа ФД-19КК с зазором 40 мкм между светочувствительными элементами. Оптимальный для регистрации световой поток подбирается с помощью светофильтра 8. На

основе сравнения распределения светового потока по квадрантам фотоприемника 9 в блоке обработки 10 [1] вырабатываются электрические сигналы U_x и U_y , пропорциональные координатам случайного положения энергетического центра тяжести (ЭЦТ) изображения. Сигналы U_x и U_y усиливаются ключевыми инвертирующими усилителями 11, 12 релейного типа с адаптивной широтно-импульсной модуляцией и подаются на двухкоординатный пьезоэлектрический дефлектор 14 [2], расположенный в канале коррекции. Полоса пропускания усилителей — $0 \div 2$ кГц, динамический диапазон — 60 дБ. Чувствительность дефлектора — $7,3 \cdot 10^{-6}$ рад/В в полосе частот $0 \div 90$ Гц, частота первого механического резонанса — 260 Гц. Пороговое угловое смещение ЭЦТ изображения, регистрируемое измерительной системой, — $3,1 \cdot 10^{-7}$ рад. Подбором коэффициентов усиления обеспечивается такое управление наклонами лазерного пучка, что в фокальной плоскости объектива 15 формируется скомпенсированное по угловому смещению изображение источника. Оптическая система в схеме контроля качества коррекции идентична оптической системе измерительного канала.

Для регистрации временных спектров смещений изображения и оценки дисперсии случайных угловых смещений используются анализаторы спектра 13, 19 типа СК4-72, которые позволяют в реальном времени (время анализа не превышает длительности анализируемой реализации) измерять амплитуду спектральных составляющих стационарных случайных сигналов в 9-ти перекрывающихся диапазонах от 0,05 Гц до 20 кГц, усреднять статистически независимые реализации спектра, получать гистограмму анализируемого сигнала.

2. Обоснование алгоритма функционирования системы

Для обоснования аппаратно-реализованного алгоритма коррекции изображения на основе общепринятого выражения вектора положения энергетического центра тяжести изображения в фокальной плоскости объектива

$$\mathbf{r}_c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(f_{06}, \mathbf{r}) \mathbf{r} d^2 r}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(f_{06}, \mathbf{r}) d^2 r}, \quad (1)$$

где $I(f_{06}, \mathbf{r})$ — распределение интенсивности излучения в фокальной плоскости, запишем случайное смещение положения ЭЦТ изображения при распространении излучения в турбулентной атмосфере в условиях, когда флуктуациями амплитуды поля можно пренебречь по сравнению с фазовыми флуктуациями, [3]

$$\mathbf{r}_c = - \frac{f_{06}}{\kappa \Sigma} \iint_{\Sigma} \nabla S(\rho) d^2 \rho, \quad (2)$$

где κ — волновое число; f_{06} , Σ — фокусное расстояние и площадь поверхности приемного объектива; $\nabla S(\rho)$ — градиент флуктуаций фазы по поверхности объектива. Интегрирование в бесконечных пределах в фокальной плоскости заменено на интегрирование по поверхности объектива. Следует заметить, что в эксперименте осуществляется полный перехват лазерного пучка апертурой объектива, а размеры светочувствительного элемента гораздо больше изображения в фокальной плоскости.

Далее воспользуемся представлением флуктуации фазы $S(\rho)$ на входной апертуре (пусть апертура — круг с радиусом R) в виде разложения [4]

$$S(\rho) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j Z_j(\rho/R), \quad (3)$$

где $Z_j(\rho/R)$ — полиномы Цернике. Ограничимся первыми шестью членами разложения, описывающими общий набег фазы, наклоны волнового фронта, дефокусировку излучения и астигматизм, и для удобства запишем их в декартовых координатах [5]:

$$S(\xi, \eta) = a_1 + a_2 \frac{\xi}{R} + a_3 \frac{\eta}{R} + 2a_4 \left(\frac{\xi^2}{R^2} + \frac{\eta^2}{R^2} - \frac{1}{2} \right) + a_5 \left(\frac{\xi^2}{R^2} - \frac{\eta^2}{R^2} \right) + 2a_6 \frac{\xi \eta}{R^2}. \quad (4)$$

Подставим $S(\xi, \eta)$ в выражение (2) и определим координаты случайного смещения положения ЭЦТ изображения:

$$x_c = - \frac{f_{06}}{\kappa R} a_2, \quad y_c = - \frac{f_{06}}{\kappa R} a_3. \quad (5)$$

В разложении (4) коэффициенты a_2 и a_3 характеризуют общие наклоны волнового фронта.

При использовании в качестве корректора плоского зеркала, управляемого по наклону относительно его взаимно ортогональных осей, профиль фазы волны, формируемый корректором, с учетом разложения (4) должен иметь следующий вид:

$$\hat{S}(\xi, \eta) = -a_2 \frac{\xi}{R} - a_3 \frac{\eta}{R}. \quad (6)$$

Коэффициенты a_2 и a_3 можно выразить через смещения ЭЦТ изображения (5), тогда

$$\hat{S}(\xi, \eta) = \kappa \frac{x_c}{f_{об}} \xi + \kappa \frac{y_c}{f_{об}} \eta. \quad (7)$$

При такой корректирующей фазе в отсутствие aberrаций выше второго порядка ЭЦТ изображения будет находиться в точке с координатами (0, 0).

Таким образом, показано, что, измеряя угловые смещения ЭЦТ изображения в фокальной плоскости объектива 7 и создавая управляемым зеркалом 14 распределение корректирующей фазы вида (7) в плоскости объектива 15, в рамках принятых ограничений на искажения фазы можно стабилизировать изображение по положению энергетического центра тяжести. Ошибки коррекции в этом случае обусловлены aberrациями высших порядков.

Кроме того, качество коррекции будет зависеть от того, насколько точно сформирована корректирующая фаза (7), а именно: измерены «смещения ЭЦТ в измерительном канале, подобраны коэффициенты передачи канала управления и обеспечена необходимая функция отклика дефлектора. При измерении смещения ЭЦТ изображения с помощью квадрантных фотоприемников сигналы с четырех светочувствительных элементов (U_1, U_2, U_3, U_4) обрабатываются по суммарно-разностному алгоритму с последующим нормированием на суммарный сигнал:

$$U_x = \gamma \frac{(U_1 + U_4) - (U_2 + U_3)}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4};$$

$$U_y = \gamma \frac{(U_1 + U_2) - (U_3 + U_4)}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}, \quad (8)$$

где γ — аппаратная константа.

При одинаковых коэффициентах передачи по всем четырем каналам величина сигнала ($U_x > U_y$) пропорциональна нормированной на суммарный поток разности световых потоков ($\Delta\Phi_x, \Delta\Phi_y$), падающих на две половины разделенного зазором фотоприемника. При гауссовском распределении интенсивности в плоскости приемника

$$\frac{\Delta\Phi(x_0)}{\Phi} = \frac{2 \int_0^{x_0} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \exp\left\{-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right\} dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \exp\left\{-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right\} dx dy} 2P\left(\frac{2x_0}{\omega}\right), \quad (9)$$

где I_0 — интенсивность излучения на оси; ω — радиус пятна, определенный по спаду интенсивности в e^2 раз; $P\left(\frac{2x_0}{\omega}\right)$ — функция распределения нормированного и центрированного нормального закона

$\left(\frac{1}{2} + P\left(\frac{2x_0}{\omega}\right)\right)$ — интегральная функция распределения; $x = x_0$ — линия зазора на фотоприемнике в системе координат, связанной с центром изображения (в системе координат, связанной с центром приемника, — x_0 — смещение ЭЦТ изображения).

Для реальных фотоприемников с шириной зазора 2δ

$$\frac{\Delta\Phi(x_0)}{\Phi} = P\left(\frac{2x_0}{\omega} - \frac{2\delta}{\omega}\right) + P\left(\frac{2x_0}{\omega} + \frac{2\delta}{\omega}\right). \quad (10)$$

Аналогично можно записать выражение для $\Delta\Phi(y_0)/\Phi$. При малых значениях аргумента ($X < 1$) функция $P(X)$ близка к линейной. Тогда при неизменяющемся в процессе измерения размере изображения сигналы с выхода блока обработки пропорциональны случайному смещению ЭЦТ изобраа-

жения. Знаки сигналов U_x и U_y определяются алгоритмом обработки (8) и соответствующим расположением квадрантов приемника относительно координатных осей. Все оптические элементы адаптивной системы юстируются в одной системе координат.

Следовательно, с помощью квадрантных фотоприемников в диапазоне линейности их позиционной характеристики можно измерять случайные смещения ЭЦТ изображения при условии слабой турбулентности, когда уширением лазерного пучка можно пренебречь.

Коэффициенты передачи канала управления подбираются в процессе настройки системы по минимуму остаточных смещений ЭЦТ изображения в канале коррекции.

3. Исследование эффективности коррекции изображения

Анализ адаптивной оптической системы проводился подобно тому, как принято анализировать системы автоматического управления: при поступлении на вход случайных воздействий определяются статистические характеристики ошибки системы по известным статистическим характеристикам воздействия и в зависимости от типа системы выбирается показатель качества.

Исследование эффективности коррекции изображения адаптивной оптической системой проводилось методом спектрального анализа. Рассматривались временные спектры случайных смещений ЭЦТ изображения. Качество коррекции оценивалось величиной

$$E_{x,y}(f) = \left[\frac{S_{x,y}(f)}{S_{x,y}^a(f)} \right]^{1/2}, \quad (11)$$

где $S_{x,y}(f)$ — спектральная плотность мощности случайных смещений ЭЦТ по оси OX , (OY) в системе без коррекции изображения; $S_{x,y}^a(f)$ — спектральная плотность мощности остаточных смещений ЭЦТ по оси OX , (OY) при адаптивной коррекции.

При достаточно большой длительности реализаций

$$E(f) = \frac{D_c}{D_k^a}, \quad (12)$$

где D_k и D_k^a — модули комплексных амплитуд спектральных составляющих разложения Фурье (далее просто амплитуды спектральных составляющих).

Так как сигналы с блока обработки 10 и 18 пропорциональны координатам случайного положения ЭЦТ изображения, то

$$E_{x,y}(f) = \left(\frac{A_k}{A_k^a} \right)_{x,y}, \quad (13)$$

где A_k и A_k^a — амплитуды спектральных составляющих анализируемых сигналов.

С учетом того, что ошибка определения $E(f)$ уменьшается, если сравниваются спектры, измеренные с помощью одних и тех же элементов системы, измерения проводились в два этапа. Сначала анализатором спектра 19 в канале коррекции измерялся спектр сигнала с блока обработки 18 в отсутствие управляющего воздействия. Затем проводились аналогичные измерения при адаптивном управлении дефлектором 14. Полученные спектры сравнивались.

Одновременно с измерениями в канале коррекции при синхронизации анализаторов спектра 19 и 13 контролировались спектры сигналов с блока обработки 10 в измерительном канале. На основе этих измерений в (13) вводился поправочный множитель, учитывающий случайные изменения спектра внешних возмущений на входе системы при переходе от первого этапа измерений ко второму.

Измерения проводились последовательно в трех частотных диапазонах: $0,05 \div 2$ Гц; $0,5 \div 20$ Гц; $5 \div 200$ Гц. Частота дискретизации анализируемого сигнала зависит от диапазона измерений и равняется утроенной верхней частоте ($3f_b$) диапазона, длительность анализируемой реализации $T_p = 608/3f_b$. Усреднение проводилось по 9-ти реализациям в диапазоне $0,05 - 2$ Гц и по 64 реализациям в двух других диапазонах. Измерялись усредненные по времени амплитуды спектральных составляющих с разрешением по частоте $\beta = f_b/200$.

По данным измерений во всем диапазоне частот ($0,05 \div 200$ Гц) оценивалась эффективность коррекции изображения

$$E_{x,y}(f_k) = \left[\frac{A_k \cdot (A_k^0)_2}{A_k^a \cdot (A_k^0)_1} \right]_{x,y}, \quad (14)$$

где f_k — центральная частота полосы пропускания k -то канала анализатора спектра; $\{A_k\}$ и $\{A_k^a\}$, $k = 1, \dots, 200$, характеризуют временной спектр сигналов, пропорциональных случайным смещениям ЭЦТ изображения, в системе без адаптивной коррекции и временной спектр сигналов, пропорциональных остаточным смещениям ЭЦТ, после компенсации случайных угловых смещений изображения; $(A_k^0)_2 / (A_k^0)_1$ — поправочный множитель.

В условиях проведения эксперимента дисперсия угловых смещений ЭЦТ изображения, регистрируемых в измерительном канале, равнялась $1,79 \cdot 10^{-10}$, в спектре случайных смещений присутствовали частоты до 120 Гц.

На рис. 2 представлены частотные зависимости эффективности компенсации угловых смещений в двух взаимно перпендикулярных плоскостях ($E_x(f)$ и $E_y(f)$).

Из полученных зависимостей видно, что показатели эффективности коррекции по обеим координатам положения ЭЦТ в среднем сосредоточены в интервале значений от 4 до 12. Наблюдается тенденция к снижению эффективности при возрастании частоты случайных смещений ЭЦТ. Большой разброс E_x и E_y на низких частотах $0,05 \div 0,3$ Гц можно объяснить недостаточной статистической обеспеченностью измерений (усреднение по 9 реализациям) и наличием некоррелированных шумов в сигналах измерительного канала и канала коррекции, связанных с вибрациями оптических элементов. Специально проведенное изучение спектров шумов, обусловленных вибрациями оптических элементов приемной системы, показало наличие практически сплошного спектра в диапазоне частот $0,05 \div 0,3$ Гц и значительно меньших отдельных спектральных составляющих в диапазоне $5 \div 130$ Гц. Представленные на рис. 2 зависимости характеризуют динамические возможности данной адаптивной оптической системы.

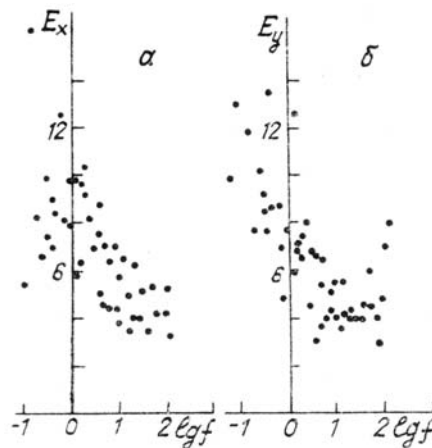


Рис. 2. Эффективность компенсации угловых смещений энергетического центра тяжести изображения (a — смещение ЭЦТ по оси OX , b — по оси OY)

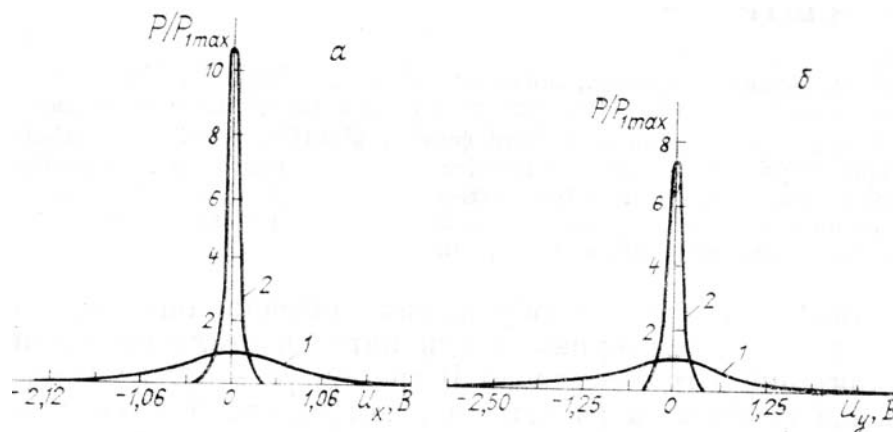


Рис. 3. Распределения вероятностей значений анализируемого сигнала, пропорционального случайному смещению ЭЦТ по оси OX (a) и по оси OY (b) в отсутствие коррекции (кривая 1) и при адаптивной коррекции изображения (кривая 2). P_{1max} — максимум распределения вероятностей в отсутствие коррекции

Совокупную по всему частотному диапазону эффективность адаптивной коррекции изображения $M_{x,y} = \sigma_{x,y} / \sigma_{x,y}^a$ ($\sigma_{x,y}$ и $\sigma_{x,y}^a$ — среднеквадратичные отклонения случайных смещений ЭЦТ изо-

бражения в системе без коррекции и при компенсации угловых смещений) можно оценить на основе сравнения гистограмм анализируемых сигналов ($U_x \sim x_c$, $U_y \sim y_c$). Набор гистограмм осуществлялся в течение 5 мин при частоте выборок 4 кГц. Интервал измеряемых значений сигнала делился на 256 подынтервалов. Длина интервала группировки 19,5 мВ при анализе сигнала, пропорционального смещению ЭЦТ по оси ОХ, 9,8 и 39 мВ — по оси ОУ при адаптивной коррекции и в ее отсутствие соответственно. Измерения проводились по той же схеме, что и при регистрации спектров. Из гистограмм определялись среднеквадратические отклонения и вычислялись значения M_x и M_y : $M_x = 5,3$; $M_y = 7,4$. Для удобства сравнения на рис. 3 совмещены распределения вероятностей значений анализируемых сигналов в системе без коррекции и с адаптивной коррекцией изображения.

Таким образом, проведенные исследования выявили достаточно высокую эффективность коррекции изображения адаптивной оптической системой, предназначенной для компенсации случайных угловых смещений ЭЦТ изображения в фокальной плоскости, использующей измеритель на основе координатного фотоприемника и оптический дефлектор в качестве управляемого элемента. Ошибки коррекции связаны с особенностями оптической схемы, с некоторыми трудностями настройки системы по коэффициенту передачи канала управления, с несовершенством элементов адаптивной оптической системы, ограниченной полосой пропускания системы.

1. Антошкин Л.В., Дудин Г.Л., Лукин В.П. // Атмосферная радиация и актинометрия (сборник научных трудов). Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 65–69.
2. Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П. // Приборы и техника эксперимента. 1988. №5. С. 211.
3. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А.С. Гурвич, А.И. Кон, В.Л. Миронов, С.С. Хмелевцев. М.: Наука, 1976. 277 с.
4. Noll R. J. // JOSA. 1976. V. 66. № 3. P. 207–211.
5. Cubalchini R. // JOSA. 1979. V. 69. № 7. P. 972–977.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
26 декабря 1988 г.

L. V. Antoshkin, N. N. Botygina, O. N. Emaleev, V. P. Lukin, S. F. Potanin.
The Adaptive Optical System for an Image Distortions Correction.

An adaptive optical system for compensating the random angular displacements of an image energy center of gravity occurring due to atmospheric turbulence is proposed. The grounds for the algorithm of the system functioning are given in the paper, and the operation of the system is analyzed. It is shown in the paper that the values of the parameter characterizing the system efficiency are from 4 to 12, depending on the frequency of random displacements of the image energy center of gravity.