

Развитие алгоритмов управления гибким зеркалом

Л.В. Антошкин, В.В. Лавринов, Л.Н. Лавринова*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 3.04.2015 г.

С целью уменьшения влияния временной задержки на работу адаптивной системы как динамической системы с обратной связью, современный подход к коррекции турбулентных искажений оптического излучения предполагает применение новых алгоритмов управления корректирующим зеркалом, использующих прогнозирование фазовых искажений. Представлены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: волновой фронт, алгоритм управления, гибкое зеркало; wave front, control algorithm, flexible mirror.

Введение

При передаче и приеме оптического излучения на большие расстояния в астрономии, а также при передаче энергии в условиях атмосферы в телекоммуникациях и лазерных системах для коррекции искажений излучения применяются адаптивные оптические системы (АОС) [1]. Предварительная работа по созданию АОС должна включать в себя рассмотрение таких аспектов, как требуемые быстродействие и качество коррекции. Современный взгляд на быстродействие коррекции предполагает использование прогнозирующих алгоритмов управления системой [2, 3]. Эти алгоритмы, включая в себя параметры турбулентности и скорости ветра [4], вычисленные на основе корреляционных свойств измеренных датчиком данных [5, 6], позволяют отслеживать эволюцию фазы во времени и тем самым повысить качество коррекции турбулентных искажений излучения посредством АОС.

Вторым важным моментом разработки АОС для решения задачи коррекции искажений, возникающих при прохождении оптического излучения через атмосферу, является подбор адаптивного зеркала с изменяемой геометрией. Для коррекции изображения, искажения которого вызваны флуктуациями волнового фронта световой волны в турбулентной атмосфере, наиболее перспективными считаются биморфные зеркала [1, 7].

В конечном итоге быстродействие и точность коррекции турбулентных искажений адаптивным зеркалом определяются оптимальностью алгоритма управления зеркалом. Любое адаптивное зеркало будет максимально точно компенсировать искажения, если управление им осуществляется на основе

конкретных значений измеряемого волнового фронта (ВФ).

Цель работы — показать, что на каждый элемент управления гибким зеркалом может быть оказано воздействие, пропорциональное значению ВФ, приходящего на входную апертуру АОС. Так как значение ВФ определяется по измерениям датчика волнового фронта Шэка–Гартмана (ДВФ Ш–Г), то оно может включать в себя прогноз, построенный на основе анализа предыдущих измерений датчика [3].

Особенности управления биморфным зеркалом

Конструкция и действие биморфного зеркала [7–10] таковы, что при воздействии на один элемент управления изменяется вся поверхность зеркала, поэтому при управлении биморфным зеркалом аппроксимация волновой функции полиномами являлась наиболее приемлемым способом представления как фазовой поверхности зеркала, воспроизводящей измеряемый ВФ, так и результата его реконструкции [1, 7, 11]. Алгоритм реконструкции в свое время позанимствован из технологии контроля качества оптических элементов и представляет собой аппроксимацию измеренных датчиком локальных наклонов комбинацией полиномов Цернике. Аппроксимация не является линейной операцией в отличие от поперечного переноса «замороженной» турбулентности под действием ветра. Это ведет к возникновению ошибки в двумерном распределении измеряемого датчиком ВФ в результате его реконструкции.

На рис. 1 представлены результаты численных экспериментов. Сценарий экспериментов следующий: гауссов пучок проходит через турбулентный экран, моделируемый спектром фон Кармана [12]:

$$\Phi_n(\mathbf{x}) = 0,489r_0^{-5/3}(\mathbf{x}_0^2 + \mathbf{x}^2)^{-11/6} \exp\left(-\frac{\mathbf{x}^2}{\mathbf{x}_m^2}\right), \quad (1)$$

* Леонид Владимирович Антошкин (lant@iao.ru); Валерий Валерьевич Лавринов (lvv@iao.ru); Лидия Николаевна Лавринова (lnl@iao.ru).

$$\text{где } r_0 = \left(0,423\kappa^2 \int_0^L C_n^2(l) dl \right)^{-3/5}; \quad \alpha_m = \frac{5,92}{l_0}; \quad \alpha_0 = \frac{2\pi}{L_0};$$

C_n^2 – структурная постоянная флуктуаций показателя преломления; L_0, l_0 – внешний и внутренний масштабы неоднородностей; L – длина трассы; $\kappa = 2\pi/\lambda$ – волновое число оптического излучения; λ – длина волны. Интенсивность фазовых флуктуаций на входной апертуре характеризуется радиусом Фрида r_0 . В экспериментах $r_0 = 5$ см; $\lambda = 0,633$ мкм.

Световое поле линзовым растром из $N_{lens} = 8 \times 8$ линз размером 640×640 мкм и фокусным расстоянием 2 мм делится на отдельные пучки, которые фокусируются в плоскости наблюдения. Координаты энергетических центров тяжести фокальных пятен (центроидов) рассчитываются по формулам [13]:

$$\xi_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} i I_i}{\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}}, \quad \eta_k = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} j I_j}{\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}},$$

$$I_i = \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}, \quad I_j = \sum_{i=1}^{n_i} I_{ij}, \quad (2)$$

где I_{ij} – измеренное значение интенсивности сигнала элемента с координатами i, j ; $i = 1, 2, \dots, n_i$; $j = 1, 2, \dots, n_j$; n_i, n_j – размеры субапертур; $k = 1, 2, \dots, N_{lens}$.

Кривые 3 и 4 на рис. 1 представляют собой профили реконструированных ВФ для турбулентных искажений, приходящих на входную апертуру системы в моменты времени t и $t + \Delta t$ (кривые 1 и 2 соответственно). Кривая 2 характеризует перенос турбулентных искажений на одну субапертуру, что соответствует поперечной составляющей скорости ветра 1,0 м/с.

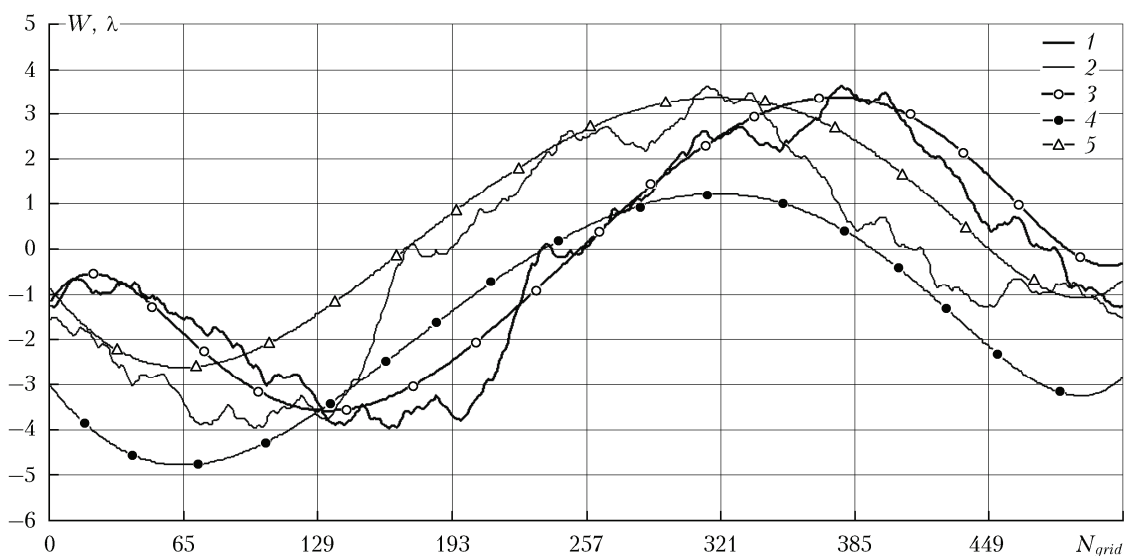


Рис. 1. Профили волновых фронтов W в длинах волн λ на сетке размером $N_{grid} = 512$: кривые 1 и 2 – на входной апертуре системы; 3, 4 – результаты разложения в ряд по полиномам Цернике; 5 – результат аппроксимации измеряемого ВФ в виде комбинации полиномов Цернике с прогнозом, построенным по статистике Тейлора

В АОС как динамической системе с характерным временем срабатывания корректирующее зеркало обрабатывает искажения ВФ, что пришли на входную апертуру системы некоторое время назад (кривая 3). Этот факт предполагает управление корректирующим зеркалом на основе прогнозирующего алгоритма, построенного на основе анализа предыдущих измерений ДВФ Ш–Г. Кривая 5 соответствует профилю реконструированного ВФ, включающего в себя информацию об изменении ВФ на время прогноза $\Delta t = 6,4$ мс. Прогноз строится на определении закономерностей эволюции параметров турбулентности и скорости ее поперечного ветрового переноса по измеренным датчиком координатам центроидов в плоскости регистрации и представляет собой разложение изменения координаты центроида в ряд Тейлора [14]:

$$\xi_k(t + \Delta t) = \xi_k(t) + \left(\frac{\Delta \xi_k(t)}{\Delta t} \right) \Delta t + 0,5 \left\{ \frac{[\Delta \xi_k(t)]/\Delta t - [\Delta \xi_k(t-1)]/\Delta t}{\Delta t} \right\} (\Delta t)^2. \quad (3)$$

Прогноз, построенный на основе статистики Тейлора, не учитывает ошибку прогноза и ошибку измерений датчика в отличие от прогнозирующего алгоритма управления с применением фильтра Калмана [3, 15, 16].

Управление зеркалом осуществляется вычислением напряжений, приложенных к элементам управления – электродам [1, 7, 8]. Напряжения на электродах зеркала, как правило, рассчитываются на основе итерационного алгоритма и перестают изменяться через 3–4 итерации. Контроль итерационного процесса осуществляется наблюдением за скорректированным ВФ, который представляется в виде разложения по полиномам Цернике. Такой алгоритм

управления гибким зеркалом имеет недостатки: затрата времени на подгонку напряжений, управляющих зеркалом, и использование для контроля за коррекцией результата аппроксимации измеряемого ВФ в виде комбинации полиномов Цернике. Фазовая поверхность гибкого зеркала обычно является результатом разложения измерений датчика по функциям отклика корректирующего зеркала. Функции отклика также содержат ошибку, поскольку получены в результате аппроксимации измерений датчика полиномами Цернике. Таким образом, чтобы минимизировать ошибку коррекции, следует отказаться от представления измеренных датчиком локальных наклонов в виде комбинации полиномов Цернике. По измеренным локальным наклонам можно вычислить значения измеряемого ВФ и, определив коэффициенты передаточных функций, реализовать по ним управление зеркалом, не теряя времени на итерационный процесс, осуществляющий контроль коррекции искажений подгонкой фазовой поверхности зеркала к реконструированному ВФ. Метод, основанный на трехмерной интерпретации преобразования ВФ при прохождении светового поля через линзовый растр [17], позволяет рассчитать значения измеряемого ВФ в конкретных точках, например в центрах субапертур в системе координат линзового растра. Далее, используя фильтр Калмана, можно получить оптимальные значения измеряемого ВФ, наиболее близкие к реальным значениям с учетом запаздывания системы.

Описание метода

При прохождении оптического излучения через одиночную субапертуру диаметром d центру тяжести фокального пятна с координатами $(\xi_k; \eta_k)$ в плоскости приемного устройства соответствует точка с координатами $(x_k; y_k; z_k)$, лежащая в плоскости, являющейся приближением первого порядка участка ВФ на входной апертуре системы.

Согласно основам геометрической оптики координаты $(\xi_k; \eta_k)$ и $(x_k; y_k; z_k)$ связаны аналитическими выражениями:

$$x_k = \operatorname{sgn}(-\xi_k) \frac{d}{2} \frac{\xi_k^2}{f\sqrt{f^2 + \eta_k^2 + \xi_k^2}}, \quad (4)$$

$$y_k = \operatorname{sgn}(-\eta_k) \frac{d}{2} \frac{\eta_k^2}{f\sqrt{f^2 + \xi_k^2 + \eta_k^2}},$$

$$z_k = f \sqrt{\frac{x_k^2 + y_k^2}{\xi_k^2 + \eta_k^2}}, \quad (5)$$

где f – фокусное расстояние.

Уравнения N_{lens} плоскостей, построенных по трем точкам с координатами: $(0; d/2; 0)$, $(d/2; 0; 0)$ и $(x_k; y_k; z_k)$, если $\xi_k < 0$ и $\eta_k < 0$, либо $(-d/2; 0; 0)$, $(0; d/2; 0)$ и $(x_k; y_k; z_k)$, если $\xi_k > 0$ и $\eta_k < 0$, либо $(0; -d/2; 0)$, $(-d/2; 0; 0)$ и $(x_k; y_k; z_k)$, если $\xi_k > 0$ и $\eta_k > 0$, либо $(d/2; 0; 0)$, $(0; -d/2; 0)$ и $(x_k; y_k; z_k)$, если $\xi_k < 0$ и $\eta_k > 0$, имеют следующий вид:

$$z_k \left[\operatorname{sgn}(\xi_k)x + \operatorname{sgn}(\eta_k)y + \frac{d}{2} \right] - z \left[-x_k - y_k + \frac{d}{2} \right] = 0. \quad (6)$$

Координата z_k соответствует значению измеряемого ВФ в системе координат k -й субапертуры. Пусть число $n = [k/M] + 1$, где $[k/M]$ – целая часть от деления, соответствует номеру строки в матрице линзового растра, $m = k - M[k/M]$ – номеру столбца, M – число столбцов. Номер субапертуры в матрице линзового растра имеет вид $k = (n-1)M + m$.

Решением системы уравнений (6) определяются значения узловых точек с координатами вида $(x_k^i; y_k^i; z_k^i)$, т.е. $(0; 0; z_k^1)$, $(d/2; d/2; z_k^2)$, $(-d/2; -d/2; z_k^4)$. Тогда значения измеряемого ВФ будут определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} z_k' &= z_k + \sum_{i=1}^m z_i^1 + \sum_{i=1}^{m-1} z_i^2, \quad n = 1, \\ z_k' &= z_k + \sum_{i=1}^n z_{M(i-1)+1}^1 + \sum_{i=1}^{n-1} z_{M(i-1)+1}^4 + \\ &+ \sum_{i=2}^m z_{M(i-1)+i}^1 + \sum_{i=1}^{m-1} z_{M(i-1)+i}^2, \quad n > 1, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$z_k^i = z_k \frac{\operatorname{sgn}(\xi_k)x_k^i + \operatorname{sgn}(\eta_k)y_k^i + d/2}{-x_k - y_k + d/2} = 0. \quad (8)$$

Набор из N_{lens} значений z_k' , вычисленных относительно координат центроидов измеряемого ВФ в системе координат линзового растра $(x_k^i; y_k^i)$, где $x_k^i = d(m-1) + d/2 + x_k$, $y_k^i = d(n-1) + d/2 + y_k$, $k = 1, 2, \dots, N_{lens}$, задает совокупность значений ВФ, приходящего на входную апертуру системы. Координаты вида $x_k^i = d(m-1) + d/2$, $y_k^i = d(n-1) + d/2$ соответствуют координатам центров субапертур в системе координат линзового растра и определяют набор из N_{lens} значений измеряемого ВФ, предназначенный для управления гибким зеркалом.

Применение метода

В [18] показано, что представление информации об измеряемом ВФ в виде двумерного фазового распределения является наиболее результативным для точности вычисления управляющих воздействий на зеркало и уменьшения влияния временной задержки. Измеряемый ВФ, обозначенный как $\Phi(x, y)$, и измеренные функции отклика зеркала $F_j(x, y)$, где $j = 1, 2, \dots, N_{act}$, как результаты единичных воздействий в точках приложения внешних сил представляют собой двумерные фазовые распределения: $\Phi(x_k^i, y_k^i) = z_k'$ и $F_j(x_k^i, y_k^i) = z_{jk}'$ в центрах субапертур.

Система уравнений $A \cdot U = B$ имеет единственное решение: $U = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T B$, где $A = [z_{jk}']$, $B = [z_k']$, $A^T = [z_{ik}']$, $U = [u_j]$ – вычисляемые напряжения. Значения z_k' , z_{jk}' рассчитаны по формулам (4)–(8).

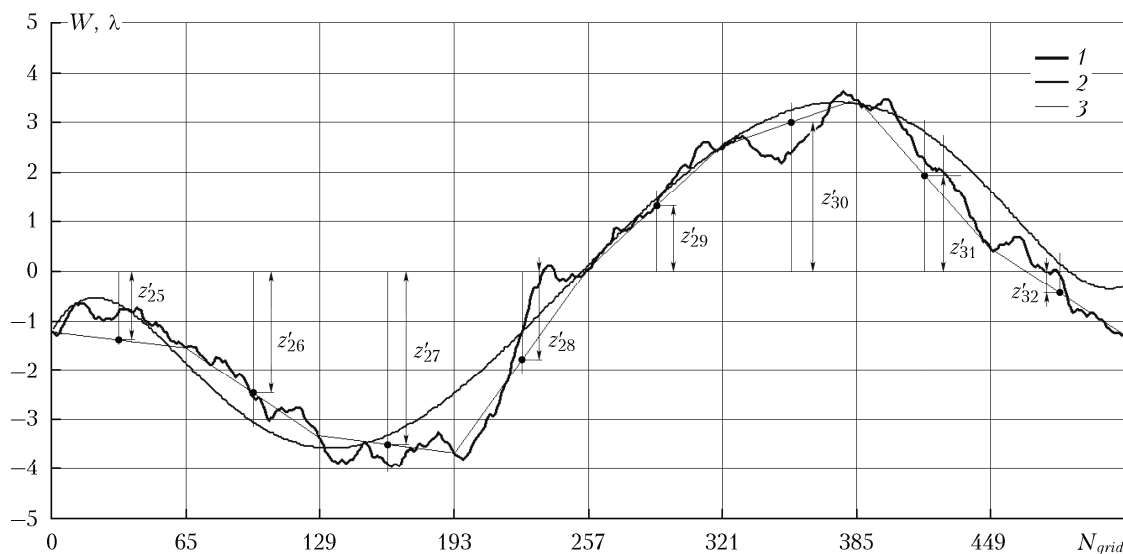


Рис. 2. Профили ВФ: кривая 1 – на входной апертуре системы; 2 – реконструированный; 3 – вычисленные по формулам (4)–(8) значения ВФ

Значения ВФ в центрах субапертур с номерами 25–32

Номер субапертуры	Измеряемый ВФ	Реконструированный ВФ	Вычисленные значения ВФ
25	-0,789686	-0,6866800	-1,380720
26	-2,538965	-3,0455050	-2,441140
27	-3,383555	-3,8210700	-3,548050
28	-1,283975	-1,2429700	-1,874990
29	1,302695	1,4356550	1,2649590
30	2,382270	3,2268100	2,9608150
31	2,284445	2,8222350	1,9627012
32	0,012422	0,1647105	-0,61513820

Важным условием адаптивной коррекции турбулентных искажений гибким зеркалом на основе информации о ВФ в виде его значений является выполнение оптического согласования центра корректирующего зеркала с центром линзового раstra.

На рис. 2 приведены результаты численных экспериментов. Профили измеряемого и реконструированного ВФ (кривые 1 и 2) взяты относительно оси, проходящей через центры субапертур с номерами 25–32. Ломаная кривая (кривая 3) соответствует значениям ВФ, рассчитанным по формулам (4)–(8).

В таблице приведены значения z'_k в длинах волн λ для измеряемого и реконструированного ВФ и вычисленные по формулам (4)–(8).

Статистический анализ значений ВФ показывает, что рассчитанные по формулам (4)–(8) значения ВФ (среднеквадратическое отклонение от среднего значения которого составляет $0,56167\lambda$) дают более близкий результат к значениям измеряемого ВФ ($\text{rms} = 0,60257\lambda$), чем значения реконструированного по полиномам Цернике ВФ ($\text{rms} = 0,72237\lambda$).

Данный подход к управлению гибким зеркалом по значениям ВФ для коррекции турбулентных искажений лазерного излучения позволяет применить прогнозирующий алгоритм. На основе анализа предшествующих измерений датчика и определенных по

ним значений ВФ можно вычислить прогнозируемые значения ВФ с применением фильтра Калмана, учитывая ошибки: эволюции системы; прогноза; измерения координат центроидов; вычисления значений ВФ.

Заключение

Представлен алгоритм управления фазовой поверхностью зеркала, который не зависит от конструкции адаптивного зеркала, но может реализовать управление зеркалом только в том случае, если адаптивная система включает в себя датчик ВФ гартмановского типа. При этом центр оптической части датчика должен быть согласован с центром адаптивного зеркала. Число элементов управления зеркалом может варьироваться и быть достаточно большим.

Преимуществом представленного алгоритма является то, что он не использует аппроксимацию ВФ полиномами. Поскольку разложение волновой функции по полиномам, например Цернике, отфильтровывает в реконструированном волновом фронте aberrации высокого порядка, то его значения существенно отличаются от значений измеряемого ВФ. Не совпадают с ними и значения ВФ, вычисленные на основе преобразования светового поля линзовым

растром ДВФ Ш–Г, так как в качестве приближения участка ВФ рассматривается плоскость. Дальнейшее развитие предложенного алгоритма управления позволит уменьшить данную пространственную ошибку и повысить точность коррекции.

Положительным моментом представленного алгоритма является органичное сочетание его возможностей с идеями прогнозирования фазовых искажений, что позволяет компенсировать недостаточное быстрое действие адаптивного зеркала.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-20013.

1. *Рукоусев А.Л., Кудряшов А.В., Лылова А.Н., Самаркин В.В., Шелдакова Ю.В.* Адаптивная оптическая система для коррекции волнового фронта в реальном времени // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 189–195.
2. *Лукин В.П.* Динамические характеристики адаптивных оптических систем // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 1027–1035.
3. *Лавринов В.В., Копылов Е.А., Лукин В.П.* Разработка эффективных алгоритмов управления адаптивными оптическими системами для астрономических приборов и лазерных оптоэлектронных систем // Сб. трудов V науч.-техн. конф. ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», Москва, 25–27 сентября, 2014. М.: Алмаз-Антей, 2014. С. 476–483.
4. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Дифференциальный метод в измерении параметров турбулентности и скорости ветра датчиком волнового фронта // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 75–80.
5. *Vernin J., Roddier F.* Experimental determination of two-dimensional spatiotemporal power spectra of stellar light scintillation. Evidence for a multilayer structure of the air turbulence in the upper troposphere // J. Opt. Soc. Amer. 1973. V. 63. P. 270–273.
6. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Измерение поперечного ветрового переноса атмосферной турбулентности на основе датчика Шэка–Гартмана // Горный информационно-аналитический журнал. 2009. Т. 17, № 12. С. 129–133.
7. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Туев М.В.* Оптимизация управления активным биморфным зеркалом на основе датчика Гартмана // Методы и устройства передачи и обработки информации. М.: Радиотехника, 2009. Вып. 11. С. 25–34.
8. *Шелдакова Ю.В., Кудряшов А.В., Рукоусев А.Л., Самаркин В.В., Черезова Т.Ю.* Использование гибридного алгоритма управления биморфным зеркалом для фокусировки светового излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 380–383.
9. *Соболев А.С., Черезова Т.Ю., Кудряшов А.В.* Аналитическая и численная модели гибкого биморфного зеркала // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 3. С. 277–281.
10. *Копылов Е.А., Лукин В.П.* Статистические характеристики биморфного зеркала DM2-100-31 и возможность его применения в адаптивной оптической схеме Большого солнечного вакуумного телескопа // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1111–1113.
11. *Безуглов Д.А., Забродин Р.А.* Методика аппроксимации гибкого адаптивного пьезокерамического зеркала ограниченным числом полиномов Цернике // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 9. С. 810–814.
12. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 211 с.
13. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Корольков В.П., Лавринова Л.Н., Насыров Р.К., Поleshuk A.G., Черкашин В.В.* Датчик Шэка–Гартмана на основе растра низкоапертурных внеосевых дифракционных линз // Автометрия. 2009. Т. 45, № 2. С. 88–98.
14. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Туев М.В.* Особенности опережающей коррекции турбулентных искажений по измерениям датчика Шэка–Гартмана // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 1042–1047.
15. *Kalman R.E.* A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME. J. Basic Eng. 1960. N 3. P. 35–45.
16. *Petit C., Conan J.-M., Kulcsar C., Raynaud H.-F., Fusco T., Montri J., Rabaud D.* First laboratory demonstration of closed-loop Kalman based optimal control for vibration filtering and simplified MCAO // Proc. SPIE. 2006. V. 6272. P. 62721T.
17. *Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Туев М.В.* Реконструкция волнового фронта по результатам преобразования светового поля датчиком Шэка–Гартмана // Автометрия. 2013. Т. 49, № 3. С. 111–120.
18. *Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Туев М.В.* Численное исследование алгоритма вычисления напряжений, выполняющих управление гибким зеркалом, в зависимости от представления информации о волновом фронте // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 10. С. 925–931.

L.V. Antoshkin, V.V. Lavrinov, L.N. Lavrinova. Development of control algorithms for flexible mirror.

In order to reduce the effect of time delay on the work of the adaptive system as a dynamic feedback system, a modern approach to the correction of turbulent distortions of optical radiation involves the use of new control algorithms for correcting mirror using prediction of phase distortion. Here the results of numerical simulation are presented.