

УДК 681.78  
EDN: PSJQYT

PACS: 42.68.Wt



## Особенности регистрации изображения высокого оптического разрешения на основе метода апертурного зондирования

П. Ц. Люй, Д. Г. Денисов, А. А. Сахаров, И. В. Животовский, В. Е. Карасик

*Проведен сравнительный анализ современных отечественных и зарубежных адаптивных оптико-электронных систем для разных задач адаптивной оптики, работающих по методам фазового сопряжения и апертурного зондирования. Впервые предлагается оценка работоспособности адаптивной оптико-электронной системы на основе обработки характеристик оптического изображения с учетом параметров турбулентной атмосферы. Предложенный подход позволит детектировать изображения удаленных объектов с высоким оптическим разрешением. Проведено макетирование лабораторной установки для проверки предложенных схемотехнических решений. Предложены критерии оценки качества оптического изображения и показано их работоспособность.*

*Ключевые слова:* адаптивная оптика, коррекция оптического изображения, атмосферная оптика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-83-90

### Введение

Атмосфера в общем случае является неоднородной [1]. Когда оптическое излучение проходит сквозь среду, которая характеризуется показателем преломления, зависящим от пространственных координат и времени, траектории световых лучей изменяются, а следовательно, изменяется форма волновых фронтов. Флуктуации показателя преломления атмосферы зависят от ветра, тепловых конвекционных токов воздуха, гравитационного поля Земли, влажности и т. д. Эти факторы

затрудняют передачу лазерного излучения через слой атмосферы, искажая излучение, нарушая его когерентность и уменьшая видимое разрешение объектов наблюдения. С целью частичного устранения данных эффектов на сегодняшний день в мировой практике применяют адаптивные оптико-электронные системы (АОЭС), представляющие из себя контур обратной связи, в котором взаимосвязаны детектор оптического сигнала и корректор излучения.

В общем случае все адаптивные системы принято классифицировать на два вида: системы, реализованные по принципу фазового сопряжения [2–4], и системы, реализованные по принципу апертурного зондирования [5, 6]. В системе фазового сопряжения пучок света отражается от малого участка объекта, образуя сферическую волну, которая проходит обратно по пути распространения света и претерпевает искажения. Пришедшая отраженная волна попадает в измерительное устройство в виде датчика волнового фронта. Посредством анализа полученного изображения выявляют-

Люй Петр Цзяншэнзович, аспирант.

E-mail: luyepetr@activeoptics.ru

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н.

E-mail: denisov\_dg@mail.ru

Сахаров Алексей Александрович, ст. преподаватель.

Животовский Илья Владимович, доцент, к.т.н.

Карасик Валерий Ефимович, профессор, д.т.н.

МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 17 октября 2022 г.

© Люй П. Ц., Денисов Д. Г., Сахаров А. А.,  
Животовский И. В., Карасик В. Е., 2022

ся искажения на атмосферной трассе исследования, после чего проводится необходимая коррекция волнового фронта устройством воздействия, компенсируя искажения на атмосферной трассе исследования. Принцип апертурного зондирования основан на возможности внесения в волновой фронт пробных возмущений. Основным отличием от метода фазового сопряжения является отсутствие прямого анализа фазовых искажений волнового фронта, поэтому в качестве детектора используют различные виды приемников излучения, в качестве которых также можно использовать датчик волнового фронта. Анализируя изменения интенсивности света, отраженного от цели, делают вывод о знаке изменения фазы и деформируют волновой фронт до тех пор, пока не будет оптимизирован выходной сигнал от излучения.

Существующие на сегодняшний день АОЭС атмосферного типа, как правило, ориентированы на получение априорной информации от опорного источника, что в свою очередь определяет условия их работы в частично-прозрачной неоднородной атмосфере. Из проведенного обзора источников исследования следует, что лишь незначительная часть посвящена коррекции оптического изображения, что является существенным на сегодняшний день недостатком при разработке современных адаптивных лазерных систем видения. Решению данной проблемы посвящены дальнейшие разделы научно-технической статьи.

### **Обзор существующих аналогов зарубежных и отечественных адаптивных оптико-электронных систем и их сравнительный анализ**

Проанализируем некоторые примеры реализаций систем в виде работающих экспериментальных установок. Адаптивная оптическая система накачки лазера PHELIX (Petawatt High-Energy Laser for Heavy-Ion Experiments) – петаваттный лазер высокой энергии для экспериментов с тяжелыми ионами [2]. В системе осуществляется коррекция излучения в лазерном резонаторе с целью обеспечения необходимого распределения интенсивности внутри системы. С помощью адаптивной оптической

системы удалось скорректировать aberrации резонатора лазера, уменьшив диаметр пучка внутри и увеличив концентрацию энергии на оптической оси. За счет этого скорость работы удалось повысить с импульса за 3 часа до импульса в 1 час 19 мин.

Проанализирована экспериментальная установка, предполагающая реализацию системы спутниковой связи, состоящей из передающей части и приемной части с адаптивным контуром, со скоростями передачи данных 100 Гбит/с [3]. При помощи коррекции после прохождения перекрестные помехи уменьшились с  $-5$  дБ и более до  $-11,7$  дБ и  $-17,6$  дБ. Адаптивная ОЭС может одновременно корректировать оптический сигнал, представляющий собой лазерный пучок, разделенный на четыре части. В результате работы адаптивной системы была повышена и стабилизирована мощность принимаемого сигнала, а также значительно уменьшились помехи системы передачи.

Далее была рассмотрена работа адаптивного оптического конфокального микроскопа [4]. В результате работы адаптивного контура в плоскости приемника излучения aberrации ОЭП уменьшились с  $PV = 1,1\lambda$  до  $PV = 0,12\lambda$ . В результате работы адаптивной системы с замкнутой обратной связью удалось улучшить качество получаемого изображения, повысить разрешающую способность системы. СКО до и после коррекции составили для длины волны  $\lambda = 633$  нм  $0,24\lambda$  и  $0,028\lambda$  соответственно. Поперечное и осевое разрешение изображения от 50 мкм ткани было повышено с 0,29 до 0,26 и с 0,74 до 0,64 мкм соответственно. Число Штреля повысилось в 2,32 раза. Адаптивная система позволила повысить разрешаемую способность микроскопа более чем в 2 раза, а яркость более чем в 2,5 раза.

Реализация методов фазового сопряжения и апертурного зондирования для одной и той же лабораторной оптической установки для коррекции искажений от атмосферной турбулентности [5] показала, что при увеличении числа итераций зависимость числа Штреля от СК фазовых отклонений стремится к пределу, число Штреля для одной величины СК отклонения при этом возрастает с увеличением числа итераций. Метод апертурного зондирования с алгоритмом градиентного спуска обладал следующими преимуще-

ствами: высокая скорость сходимости, независящая от пространственного разрешения; параллельный алгоритм управления адаптацией; устойчивость к сцинтилляции интенсивности излучения на входе системы; широкий спектр применимых датчиков излучения.

Система адаптации излучения для системы оптической связи [6] работает по методу апертурного зондирования. Работа данной адаптивной ОЭС уменьшила предел отклонения лазерного пучка от оптической оси с 60 до 8 мкрад, при этом среднее время нахождения пучка на оптической оси увеличилась более чем в 10 раз. Система позволяет с высокой эффективностью корректировать принимаемый сигнал, концентрируя полезное излучение в центральной области. Таким образом повышаются разрешающая способность приемной оптической системы и скорость передачи полезной информации.

Сводные данные рассмотренных систем представлены в табл. 1. Из анализа стоит выделить, что метод фазового сопряжения поз-

воляет добиться наиболее высокой скорости работы адаптивного контура при восстановлении волнового фронта оптического излучения. При этом метод апертурного зондирования способно достигать более высокой степени точности коррекции распределения интенсивности излучения. Однако стоит заметить, что на данный момент не существует систем коррекции оптического изображения от случайного объекта, находящегося в условиях турбулентной атмосферы, без создания искусственных эталонных объектов для адаптации. Таким образом в данной работе предлагается актуальный подход по методике проектирования современных АОЭС.

В перспективе для коррекции оптического излучения с целью уменьшения искажений изображения наблюдаемого объекта предполагается разработка АОЭС, совмещающей при работе методы как апертурного зондирования, так и фазового сопряжения. В данной работе рассмотрена реализация метода апертурного зондирования.

Таблица 1

Основные параметры АОЭС

Пример применения адаптивной системы	Число Штреля	Улучшение выходного сигнала	Улучшение разрешающей способности	Уменьшение помех
Система спутниковой связи	Улучшение в 5 раз, >0,9	От 2,8 до 70 раз		На 10 дБ
Широкоапертурный микроскоп		В 1,2 раз		
Конфокальный микроскоп	0,964	В 2,32 раз	> 2 раз	
Система коррекции искажений	Улучшение в 5 раз, 0,9			
Система оптической связи	Улучшение в 10 раз			В 12 раз

### Предлагаемые научно-технические решения

Предлагаемые научно-технические решения для расчета АОЭС основаны на следующей функционально-оптической схеме на основе идеологии и принципов апертурного зондирования (рис. 1). Неоднородная среда оптически сопряжена с адаптивным зеркалом АЗ первой оптической системой. При этом оптическая система линз создает изображение объекта на плоскости фотоприемной матрицы ПЗС.

В результате проведения моделирования проанализированы различные варианты схемотехнических и конструктивных решений с целью выбора оптимального варианта постро-

ения системы с целью дальнейшего макетирования. Предварительно был проведен габаритный, абберационный, светоэнергетический и точностной расчеты [7, 8] с учетом особенностей АОЭС. Проверка характеристик и оптимизация оптической системы проводилась в среде проектирования и пакете программ Zemax. Абберации и радиус пятна рассеяния лучшего варианта двухлинзовой системы имеют слишком большие значения для нашей задачи (порядка  $10\lambda$ ). Вторая оптическая система представляет собой наилучший вариант трехлинзовой оптической системы. Абберации системы в целом удовлетворяют необходимым требованиям. Радиус пятна рассеяния несколько превосходит радиус пятна рассеяния Эйри, оптическая передаточная функция

приемлема для заданных критериев, число Штреля равно 0,802, что подходит для решаемых задач. Оптическая система из четырех линз также была рассмотрена. Аберрации системы удовлетворяют необходимым требованиям более чем, радиус пятна рассеяния примерно соответствует радиусу пятна рассеяния

Эйри, оптическая передаточная функция близка к дифракционному пределу, число Штреля равно 0,965. Данная оптическая система удовлетворяет необходимым требованиям изображающей оптической схемы. Сводные данные по оптимальным показателям всех трех систем приведена в табл. 2.

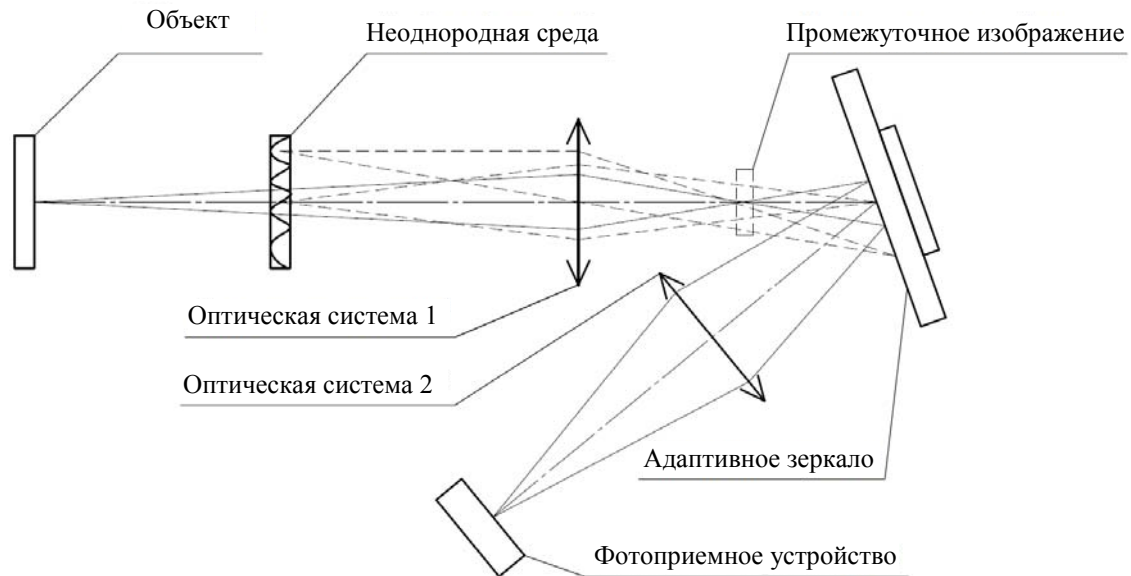


Рис. 1. Принципиальная схема адаптивной системы

Таблица 2

Основные параметры оптических систем

Оптическая система	«Двухлинзовая»	«Трехлинзовая»	«Четырехлинзовая»
СКО радиуса пятна рассеяния, мкм	171,4	11,79	5,74
Радиус кружка Эйри, мкм	12,39	7,592	7,66
Волновая аберрация, $\lambda$	7,8	0,5	0,25
Число Штреля	0,029	0,802	0,965

Следует учитывать, что данные выше характеристики не учитывают возможности функционирующего корректора волнового фронта. Включенное адаптивное зеркало способно улучшить параметры оптической системы, уменьшив аберрации и пятно рассеяния, увеличить число Штреля и улучшить ОПФ всей оптической системы. Исходя из данной особенности работы адаптивной ОЭС трехлинзовая оптическая система является наиболее оптимальной для проверки работоспособности предложенных критериев.

Обратим внимание, что адаптивная оптическая система, работающая по методу апертурного зондирования, для оптимального режима функционирования нуждается в пра-

вильном выборе числового критерия для оценки качества исправляемого излучения. Он определяет возможность коррекции, правильность направления и шага приближений и минимальное число итераций, необходимое для достижения необходимого результата. Предложены следующие критерии для оценки качества цифрового изображения, которые не основаны на сравнении с референтным изображением.

Предлагается критерий резкости контуров, или градиент распределения интенсивности, который основывается на измерении угла наклона контуров на изображении, которые являются границами между различными объектами и фоном, и является видоизмененным

способом вычисления градиента. Сам алгоритм вычисления критерия включает в себя определение границ, их ширины, максимального перепада интенсивности на них. Самым простым методом определения угла наклона границ будет анализ изображения по строкам и столбцам пикселей. Если перепад интенсивности между двумя соседними пикселями превышает некоторое пороговое значение, то они принимаются за часть границы, для них вычисляется тангенс угла, который будет участвовать в вычислении числового критерия.

Также одним из параметров, которые определяют качество изображений, является контраст, который можно также использовать в качестве критерия качества. Поскольку изображение содержит большое количество информации о положении пикселей и их яркости, то это порождает необходимость при определении его контрастности выходить из контраста отдельных комбинаций элементов изображения, при этом все элементы считаются равнозначными. Контраст вычисляется как для элементов попарных по одному направлению, так и по второму. Цифровое изображение, обладающее более высоким контрастом, по данному критерию считается наиболее качественным и наименее искаженным. Недостатком является потеря информации в локальных фрагментах изображения.

В результате математического моделирования в пакете прикладных программ MATLAB была показана возможность коррекции изображения по выработанным критериям. За три цикла работы максимальный межпиксельный контраст увеличился с 0,144 до 0,183, средний контраст всего изображения – с 0,0316 до 0,037, контраст изображения по максимальному и минимальному значению – с 0,953 до 0,958. При этом также улучшилось качество изображения по качественной визуальной оценке. Данные результаты демонстрируют применимость разработанных критериев для работы оптико-электронных систем с адаптацией параметров оптического излучения, работающих по методу апертурного зондирования.

Экспериментальная установка представлена на рис. 2 и состоит из осветительной ветви и измерительной. Осветительная система состоит из лазерного источника излучения,

соединенного оптоволоконным выходом с коллиматором для освещения тест-объекта в виде миры «2" × 2" USAF 1951 Hi-Resolution Target». Излучение от миры проходит через первую линзу «N-BK7 Plano-Convex Lens Ø1"  $f = 300 \text{ mm}$ » и отражается от адаптивного биморфного зеркала. После отражения от зеркала излучение проходит через вторую линзу «N-BK7 Plano-Convex Lens Ø2"  $f = 500 \text{ mm}$ » и третью «N-BK7 Plano-Convex Lens Ø1"  $f = 150 \text{ mm}$ », формируя изображение миры на матрице фотоприемника в камере «The Imaging Source DMK 23G618». Между мирой и первой линзой для имитации фазовых искажений от атмосферной турбулентности располагается фазовая пластинка, которая вносит случайные фазовые искажения в распространяющийся волновой фронт излучения.

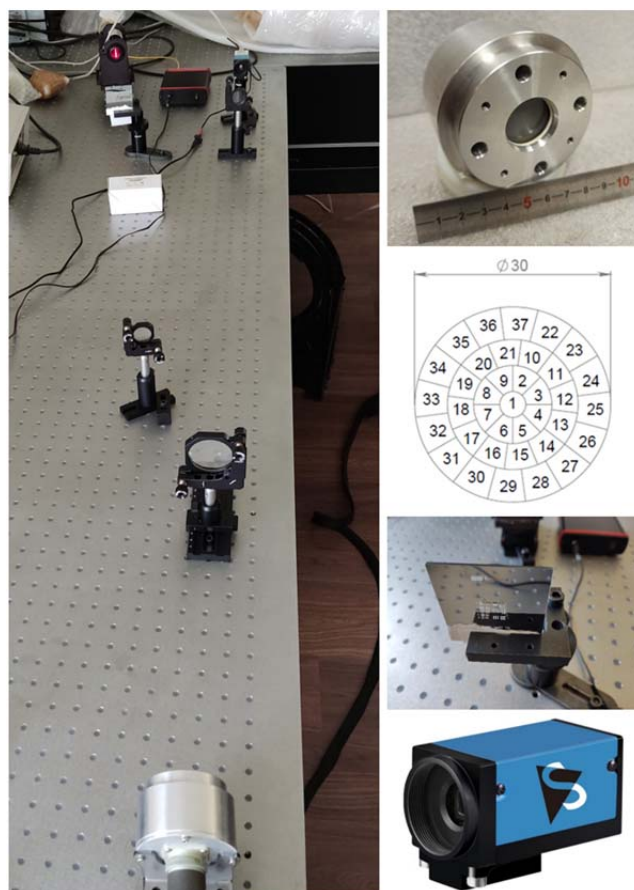


Рис. 2. Общий вид оптической системы лабораторной установки и основных компонентов лабораторной установки

Адаптивное зеркало представляет собой биморфное зеркало с 37 управляющими электродами, соединенными с пьезокерамикой на

общей подложке. Диаметр подложки 30 мм, рабочий световой диаметр 25 мм.

Характеристики биморфного зеркала:  
диапазон управляющих напряжений:  
–200...+250 В;  
количество электродов управления: 37;  
апертура зеркала: 30 мм;  
частота первого резонанса: 13,2 кГц;  
максимальное перемещение поверхности:  
 $\pm 2,5$  мкм;  
толщина зеркала: 1,6 мм;  
средняя площадь электрода: 14,4 мм<sup>2</sup>.

Для работы алгоритма апертурного зондирования предполагается адаптация от низших порядков деформации формы профиля поверхности к высшим. Для этого были дополнительно записаны отклики каждого электрода с помощью датчика волнового фронта типа Шака-Гартмана. На основе снятых значений методом наименьших квадратов были рассчитаны значения совокупности напряжений, необходимых для воспроизведения аберраций поверхности адаптивного зеркала, записанных в виде полиномов Цернике.

Тест-объект в оптической системе лабораторной установки искажается внесенным в оптическую систему случайным фазовым экраном. При искажении адаптивное зеркало изменяет свою форму, создавая собственные искажения в оптической системе. Полученные в результате покомпонентной оптимизации значения числовых критериев цифровых изображений приведены в табл. 3. Работа системы адаптации показала, что числовые критерии примерно соответствуют визуальному восприятию и анализу профиля распределения освещенности на фотоприемном устройстве.

Таблица 3

**Числовые критерии полученных цифровых изображений**

	$C$	$C_{sum}$
Без фазовой пластинки	0,968	0,492
С фазовой пластинкой	0,959	0,332
Дефокусировка $-\lambda$	0,951	0,321
Дефокусировка $\lambda$	0,947	0,322
Сферическая аберрация $-0,3\lambda$	0,946	0,343
Сферическая аберрация $-0,15\lambda$	0,955	0,336
Сферическая аберрация $0,15\lambda$	0,962	0,351
Сферическая аберрация $0,3\lambda$	0,964	0,457

Полученные результаты эксперимента свидетельствуют о соответствии разработанных критериев с визуальной оценкой качества и разрешением оптической системы. При увеличении разрешения в результате адаптации также увеличиваются числовые критерии.

Таким образом была рассчитана оптическая система, включающая в себя три линзы, обладающая следующими параметрами: СКО радиуса пятна рассеяния 11,79 мкм, радиус кружка Эйри 7,592 мкм, волновая аберрация  $0,5\lambda$ , число Штреля 0,802. С учетом коррекционных возможностей биморфного зеркала по уменьшению аберрации и пятна рассеяния, увеличения числа Штреля и улучшения ОПФ всей оптической системы рассчитанная оптическая система подходит для коррекции формирующего изображение оптического излучения.

Лабораторная установка оптико-электронной системы с системой коррекции искажений волнового фронта оптического излучения была спроектирована и собрана. Установка состоит из лазерного источника излучения, коллиматора, тест-объекта в виде миры, биморфного зеркала, фотоприемника, системы линз и имитатора неоднородной среды в виде фазовой пластинки. Проведен эксперимент с получением изображений, искаженных случайной фазовой пластинкой при работающем адаптивном зеркале для воспроизведения процесса коррекции волнового фронта лазерного излучения.

Анализ и коррекция изображения точечного объекта по выработанным критериям дали следующий результат. Изображение без искажений дает максимальный контраст 0,968, средний контраст – 0,492, при искажении – соответственно 0,959 и 0,332, после коррекции – соответственно 0,964 и 0,457. Таким образом, разработанные числовые критерии при оценке локальных искажений с высокой пространственной частотой объекта были проанализированы и продемонстрировали высокую сходимость с визуальной оценкой качества цифровых изображений.

### Заключение

В ходе данной работы был проведен анализ существующих отечественных и зару-

бежных АОЭС, работающих по методу как апертурного зондирования, так и фазового сопряжения, результаты заявленных возможностей представлены в табл. 1. Метод фазового сопряжения позволяет добиться наиболее высокой скорости работы адаптивного контура при восстановлении волнового фронта оптического излучения. При этом метод апертурного зондирования способно достигать более высокой степени точности коррекции распределения интенсивности излучения. Однако на данный момент не существует систем коррекции оптического изображения от случайного объекта, находящегося в условиях турбулентной атмосферы, без создания искусственных эталонных объектов для адаптации.

Были предложены критерии работы метода апертурного зондирования для АОЭС изображающего типа, функционирующей в лабораторных условиях с имитаторами неоднородностей атмосферы: критерий резкости контуров, критерий максимального контраста, критерий межпиксельного контраста. Также проведен численный анализ критериев работы метода апертурного зондирования на основе моделирования процесса прохождения лазерного излучения через слой неоднородной атмосферы при средней турбулентности. Результаты математического моделирования показали возможность коррекции изображения по выработанным критериям. За три цикла работы максимальный межпиксельный контраст увеличился с 0,144 до 0,183, средний контраст всего изображения – с 0,0316 до 0,037, контраст изображения по максимальному и минимальному значению – с 0,953 до 0,958. При этом также улучшилось качество изображения по качественной визуальной оценке.

Предложены этапы проектирования ОЭС изображающего типа на основе метода апертурного зондирования на основе габаритного,

абберационного и точностного расчетов с учетом заданных критериев и требований. Анализ и коррекция изображения точечного объекта по выработанным критериям дали результат, представленный в табл. 3. Таким образом, разработанные числовые критерии при оценке локальных искажений с высокой пространственной частотой объекта были проанализированы и продемонстрировали высокую сходимость с визуальной оценкой качества цифровых изображений. В дальнейшем планируется разработка системы коррекции оптического изображения от объекта наблюдения на основе метода фазового сопряжения при отсутствии априорной информации об объекте для реализации комплексного метода коррекции АОЭС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Филатов А. А. Адаптивная оптика. – СПб: НИУ ИТМО, 2012.
2. Hans-Martin Heuck, Ulrich Wittrock, Jerome Fils, Stefan Borneis, Klaus Witte, Udo Eisenbarth, Dasa Javorkovab, Vincent Bagnoudb, Stefan G`otteb, Andreas Tauschwitzb, Eckehard Onkels. // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6584. P. 658402. DOI: 10.1117/12.723380.
3. Yongxiong Ren, Guodong Xie, Hao Huang, Nisar Ahmed, Yan Yan, Long Li, Changjing Bao, Martin P. J. Lavery, Moshe Tur, Mark A. Neifeld, Robert W. Boyd, Jeffrey H. Shapiro, Alan E. Willner // Optica. 2014. Vol. 1. P. 376. DOI: 10.1364/OPTICA.1.000376.
4. Xiaodong Tao, Bautista Fernandez, Oscar Azucena, Min Fu, Denise Garcia, Yi Zuo, Diana C. Chen, Joel Kubby // Opt. Lett. 2011. Vol. 36. P. 1062. DOI: 10.1364/OL.36.001062.
5. Vorontsov M. A. // J. Opt. Soc. Am. A. 2002. Vol. 19. P. 356. DOI: 10.1364/JOSAA.19.000356.
6. Weyrauch T., Vorontsov M. // J. Optic Comm Rep. 2004. Vol. 1. P. 355. DOI: 10.1007/s10297-005-0033-5.
7. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для студентов вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Логос, 1999.
8. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учебное пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, 1977.

## Features of high optical resolution image registration based on the high-climbing method

*P. Ts. Liui, D. G. Denisov, A. A. Sakharov, I. V. Zhivotovskii and V. E. Karasik*

Bauman Moscow Technical University  
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia  
E-mail: denisov\_dg@mail.ru

*Received October 17, 2022*

***Modern domestic and foreign adaptive optoelectronic systems for various tasks of adaptive optics, using the methods of phase conjugation and aperture sounding, have been compared and analysed. The new approach for designing adaptive optoelectronic systems of the atmospheric type for correcting distortions of laser radiation forms an optical image is proposed. Prototyping of a laboratory setup was carried out to test the proposed circuit solutions. Criteria for assessing the quality of an optical image are proposed and a semi-natural study of their performance is carried out.***

*Keywords:* adaptive optics, optical image correction, atmospheric optics.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-83-90

### REFERENCES

1. E. V. Ermolaeva, V. A. Zverev and A. A. Filatov, *Adaptivnaya optika*. (ITMO University, Saint Petersburg, 2012).
2. Hans-Martin Heuck, Ulrich Wittrock, Jerome Fils, Stefan Borneis, Klaus Witte, Udo Eisenbartb, Dasa Javorkovab, Vincent Bagnoudb, Stefan G'otteb, Andreas Tauschwitzb and Eckehard Onkels, *Proc. of SPIE* **6584**, 658402 (2007). DOI: 10.1117/12.723380.
3. Yongxiong Ren, Guodong Xie, Hao Huang, Nisar Ahmed, Yan Yan, Long Li, Changjing Bao, Martin P. J. Lavery, Moshe Tur, Mark A. Neifeld, Robert W. Boyd, Jeffrey H. Shapiro and Alan E. Willner, *Optica* **1**, 376 (2014). DOI: 10.1364/OPTICA.1.000376.
4. Xiaodong Tao, Bautista Fernandez, Oscar Azucena, Min Fu, Denise Garcia, Yi Zuo, Diana C. Chen and Joel Kubby, *Opt. Lett.* **36**, 1062 (2011). DOI: 10.1364/OL.36.001062.
5. Mikhail A. Vorontsov, *J. Opt. Soc. Am. A* **19**, 356 (2002). DOI: 10.1364/JOSAA.19.000356.
6. T. Weyrauch and M. Vorontsov, *J. Optic Comm Rep* **1**, 355 (2004). DOI: 10.1007/s10297-005-0033-5.
7. Yu. G. Yakushenkov, *Teoriya i raschet optiko-elektronnyh priborov*: Uchebnik dlya studentov vuzov (LOGOS, Moscow, 1999).
8. M. M. Miroshnikov, *Teoreticheskie osnovy optiko-elektronnyh priborov* (Mashinostroenie, Leningrad, 1977).