

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.А. Сахаров

smx@bmstu.ru

И.В. Животовский

ivj@bmstu.ru

В.Е. Карасик

karassik@bmstu.ru

Е.Е. Мухина

emuhina@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены методика светоэнергетического расчета датчика волнового фронта с усилителем яркости и способ, позволяющий получить первичную гартманограмму с минимальной погрешностью для датчика волнового фронта. Проанализированы требования к техническим характеристикам видеокамер, используемых в адаптивных оптических системах, и рассмотрены ключевые требования к ним. Показаны необходимость и преимущества применения в составе датчика волнового фронта электронно-оптического преобразователя. Приведены расчеты отношения сигнал/шум для датчиков на основе скоростных видеокамер с усилителем яркости и без него. Выявлено, что применение электронно-оптического преобразователя в адаптивных оптических системах, используемых на горизонтальных трассах, существенно увеличивает дальность их работы. Показано, что разработанная методика светоэнергетического расчета выявляет преимущества адаптивных оптических систем с датчиками волнового фронта на основе электронно-оптического преобразователя, а способ получения референсной гартманограммы позволяет получить волновой фронт с минимальной погрешностью относительно математически рассчитанного идеального. Отмечено, что результаты приведенного исследования указывают на возможность получения референсной гартманограммы в условиях, приближенных к работе на трассах с повышенной турбулентностью, что улучшает качество работы адаптивных оптических систем

Ключевые слова

Адаптивная оптика, электронно-оптический преобразователь, датчик волнового фронта, турбулентность, оптика атмосферы, светоэнергетический расчет, микролинзовый растр

Поступила 11.12.2023

Принята 04.03.2024

© Автор(ы), 2024

Введение. Системы оптической локации и дальнометрии, функционирующие с кооперируемыми объектами, часто снабжаются световозвращательными устройствами, которые существенно повышают потенциал этих систем. Вместе с тем энергетический потенциал подвержен негативному влиянию атмосферного канала, турбулентность которого приводит к блужданию пучка в передающей оптической системе (ОС) и удорожанию изображения в приемной ОС. В целях повышения эффективности лазерных локационных систем представляется перспективным использование в их составе адаптивных ОС (АОС). Эффект световозвращения, возникающий при зондировании световозвращающих систем, эквивалентен в данном случае формированию точечного источника световой волны с плоским волновым фронтом, что необходимо для корректной работы АОС.

Вследствие небольших размеров световозвращающего источника величина ретроотраженного потока недостаточна для работы обычных АОС. Более того, используемый во многих АОС (в силу простоты решения и относительной дешевизны изготовления) датчик волнового фронта (ДВФ) типа Шака — Гартмана [1–3] уменьшает весь проходящий световой поток на величину, пропорциональную числу элементов его микролинзового раstra. Наклонные и горизонтальные трассы характеризуются большими значениями структурной постоянной C_n^2 [2]. Кроме высокой чувствительности требуется обеспечить еще и высокую скорость работы, которую в этом случае можно получить при использовании высокоскоростных видеокамер.

В связи с этим для повышения ОСШ на выходе АОС стараются либо увеличить апертуру ОС, либо использовать фотоприемные устройства с повышенной чувствительности. Первый способ приводит к неоправданному увеличению габаритных размеров, стоимости и сроков производства (изготовление оптических элементов большого диаметра занимает длительное время) и больше подходит для стационарных систем, чем для мобильных. Второй способ, при котором выбирается высокочувствительная видеокамера, часто применяется в астрономических системах, однако такие видеокамеры, как правило, являются низкоскоростными, что совершенно неприемлемо для большинства АОС.

Методика светоэнергетического расчета ДВФ с усилителем яркости. В настоящей работе для увеличения ОСШ предлагается использовать усилитель яркости в составе ДВФ, что существенно уменьшает габаритные размеры и стоимость АОС, а также значительно повышает чувствительность системы при увеличении дальности их работы.

Структурная схема АОС повышенной чувствительности, работающей как на наклонной, так и на вертикальной трассах, приведена на рис. 1. Подсветка удаленного световозвращателя осуществляется импульсным лазером с частотой 2 кГц, что подходит для использования на горизонтальных трассах, где в основном и работают системы лазерной локации и дальнометрии. Ретроотраженный поток света попадает на адаптивное зеркало, которое используется для коррекции aberrаций, возникающих вследствие турбулентности в пространстве между АОС и световозвращателем. Для анализа этих aberrаций одна часть светового потока направляется светоделителем на ДВФ, состоящий из микролинзового раstra, электронно-оптического преобразователя (ЭОП), проекционного объектива, переносящего изображение с ЭОП на матрицу скоростной CMOS-видеокамеры. Другая часть светового потока следует в объектив видеокамеры и формирует изображение удаленного световозвращателя на фоне подстилающей поверхности.

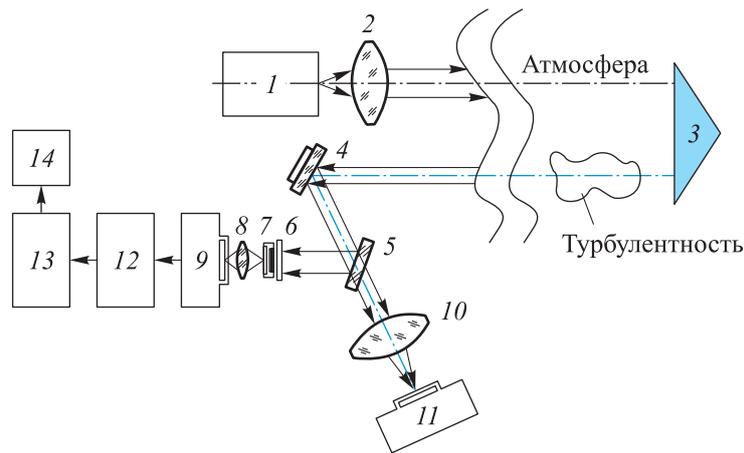


Рис. 1. Структурная схема АОС повышенной чувствительности:

- 1 — лазер; 2 — передающая ОС; 3 — световозвращатель; 4 — адаптивное (деформируемое) зеркало; 5 — светоделитель; 6 — микролинзовый растр; 7 — ЭОП;
- 8 — проекционный объектив; 9, 11 — CMOS-видеокамеры; 10 — объектив изображающей системы; 12 — блок обработки; 13 — система отображения информации;
- 14 — блок управления деформируемым зеркалом

Полученные Фридом соотношения для дисперсии фазовых искажений [4–6] базируются на модели атмосферной турбулентности Колмогорова — Обухова и позволяют определить значение допустимой динамической погрешности работы АОС, которая не приводит к потере качества изображения.

Для системы управления деформируемым зеркалом с частотой f_{3dB} (ширина полосы по уровню 3 дБ) вариация угла наклонов после компенсации составит [7–9]:

$$\sigma_{\alpha}^2 = \left(\frac{f_G}{f_{3dB}} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{D} \right)^2, \quad (1)$$

где f_G — частота Гринвуда; D — диаметр входного зрачка ОС.

Для горизонтальной трассы, приподнятой на 10° , при постоянных C_n^2 выражение (1) примет вид

$$f_G = 0,331 D^{-1/6} \lambda^{-1} \sqrt{\sec \beta} [C_n^2 V_{\perp}^2 l]^1, \quad (2)$$

где β — угол наклона трассы; V — скорость ветра; l — расстояние до лоцируемого объекта.

Для горизонтальных трасс частота Гринвуда определяется по следующей формуле [9]:

$$f_G = \frac{0,43V}{r_0},$$

где $r_0 = 3,02 (C_n^2 l k^2)^{-3/5}$ — радиус Фрида. При $D = 100$ мм, $C_n^2 = 10^{-15}$ и $\lambda = 0,7$ мкм получим $f_G = 180$ Гц, тогда частоту кадров f_{3dB} видеокамеры, используемой в ДВФ АОС для минимизации погрешности, определяемой (1), следует учесть как $\sim 10 f_G$, т. е. $f_{3dB} \approx 1...2$ кГц. В этом случае остаточные aberrации после корректирующего зеркала будут пренебрежимо малыми [10–12].

Для повышения чувствительности ДВФ АОС увеличение диаметра апертуры даже в 10 раз приводит к увеличению регистрируемого потока в 100 раз [13], в то время как при использовании усилителя яркости в виде ЭОП коэффициент преобразования яркости составит $\sim 10^4$, что можно считать эквивалентом увеличения потока в это же число раз [14, 15].

Схема работы такого ДВФ с усилителем яркости приведена на рис. 2. Предлагаемая далее методика светоэнергетического расчета в полной мере соотносится с этой схемой.

Результаты расчетов. В настоящей работе для обоснования необходимости использования ЭОП приведена методика светоэнергетического расчета для ДВФ с усилителем яркости при работе по световозвращающему объекту.

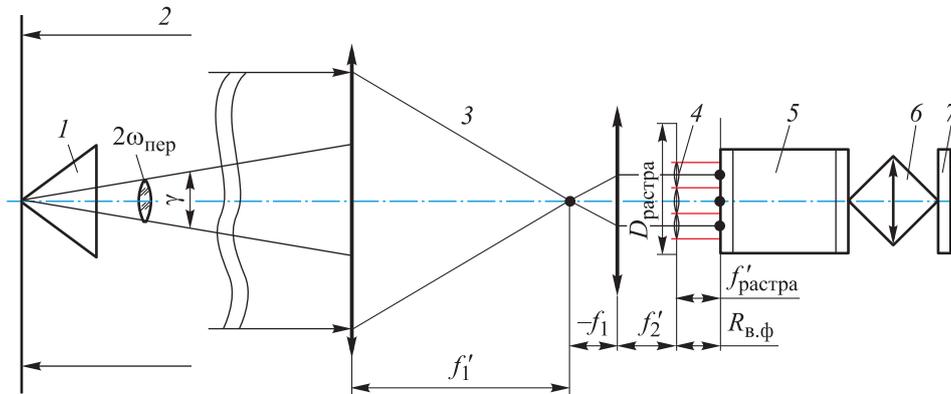


Рис. 2. Схема процессов подсвета и фоторегистрации ретроотраженного лазерного излучения от световозвращателя в модифицированном ДВФ на основе ЭОП:

1 — световозвращатель (угловой отражатель); 2 — проецирующийся в плоскости световозвращателя лазерный пучок с заданной угловой расходимостью; 3 — приемная оптическая система; 4 — микролинзовый растр; 5 — ЭОП; 6 — репродукционный объектив; 7 — ПЗС-матрица

Основным критерием, определяющим энергетическую эффективность работы АОС, является ОСШ, поэтому в результате проведения светоэнергетического расчета [16] будет получено ОСШ АОС в составе активной лазерной локационной системы на основе модифицированного ДВФ.

Для получения значения ОСШ необходимо провести оценку средних чисел сигнальных, фоновых и обусловленных диффузно-отраженным лазерным излучением фотоэлектронов за время накопления T_n в одном элементе ПЗС-матрицы.

Рассчитаем среднее число сигнальных фотоэлектронов \bar{N}_c . Оптический поток в плоскости выходного зрачка одного элемента микролинзового растра определяется выражением

$$F_{sub} = \frac{P_l (\tau_{атм})^2 \tau_{ОС} R}{\pi (\omega_l)^2 N_{px} N_{py} l^4} \int_{-D_{пр}/2}^{D_{пр}/2} \int_{-D_{пр}/2}^{-D_{пр}/2} \text{circ}(x, y) \exp\left(\frac{-2(x^2 + y^2)}{\gamma^2 l^2}\right) dx dy, \quad (2)$$

где P_l — мощность лазерного излучения; $\tau_{атм}$ — коэффициент пропускания атмосферы; $\tau_{ОС}$ — коэффициент пропускания ОС; R — показатель световозвращения; ω_l — угол расходимости излучения лазера; γ — угол световозвращения; N_{px}, N_{py} — число элементов ПЗС-матрицы

по горизонтали и вертикали; l — дальность до световозвращающего объекта; $D_{\text{пр}}$ — диаметр входного зрачка приемной ОС.

Оптический поток F и яркость $L_{\text{ЭОП}}$ на экране ЭОП определяются по выражениям:

$$F = F_{\text{sub}} \eta_{\text{ЭОП}}; \quad (3)$$

$$L_{\text{ЭОП}} = \frac{F}{S_{\text{фк}} \cdot 2\pi}, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{ЭОП}}$ — коэффициент преобразования ЭОП; $S_{\text{фк}}$ — площадь экрана ЭОП.

Светимость экрана ЭОП:

$$M_{\text{ЭОП}} = \pi L_{\text{ЭОП}}. \quad (5)$$

Отсюда можно определить освещенность фоточувствительной области ПЗС-матрицы

$$E_{\text{ПЗС}} = \eta_{\text{ЭОП_ПЗС}} M_{\text{ЭОП}} \quad (6)$$

и оптический поток в плоскости ПЗС-матрицы

$$F_{\text{ПЗС}} = E_{\text{ПЗС}} S_{\text{ПЗС}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{ПЗС}}$ — площадь фоточувствительной области ПЗС-матрицы.

Среднее число сигнальных фотоэлектронов в одном пикселе:

$$\bar{N}_c = \frac{F_{\text{ПЗС}} T_{\text{н}} \eta_{\text{ПЗС}}}{E_{\text{ф}} S_{\text{pix}}}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{ПЗС}}$ — квантовая эффективность ПЗС-матрицы; $E_{\text{ф}}$ — энергия фотона; S_{pix} — площадь одного пикселя ПЗС-матрицы.

Рассчитаем среднее число фотоэлектронов, обусловленных диффузно-отраженным лазерным излучением $\bar{N}_{\text{диф}}$.

Для круглого зрачка, фиксированной угловой расходимости излучения лазера $2\omega_{\text{л}}$ и поля зрения приемной ОС $2\omega_{\text{пр}}$ оптический поток в плоскости входного зрачка одного элемента микролинзового раstra, используя выражение (2), можно записать как

$$F_{\text{sub}} = \frac{P_{\text{л}} (\tau_{\text{атм}})^2 \tau_{\text{ОСР}} D_{\text{пр}}^2 (\omega_{\text{пр}})^2}{4\pi (\omega_{\text{л}})^2 N_{\text{px}} N_{\text{py}} l^2}, \quad (9)$$

где ρ — коэффициент отражения.

Среднее число сигнальных фотоэлектронов в одном пикселе можно рассчитать по формуле

$$\bar{N}_{\text{диф}} = \frac{F_{\text{ПЗС}} T_n \eta_{\text{ПЗС}}}{E_{\text{ф}} S_{\text{pix}}}. \quad (10)$$

Среднее число фоновых фотоэлектронов, накопленных одним элементом ПЗС-матрицы от одного элемента микролинзового растра $\bar{N}_{\text{диф}}$, рассчитывается по формулам (3)–(10), при этом оптический поток в плоскости входного зрачка одного элемента микролинзового растра определяется из выражения

$$F_{2sub} = \frac{\tau_{\text{атм}} \tau_{\text{ОС}} \rho D_{\text{пр}}^2 (\omega_{\text{пр}})^2 \pi E_{\text{ф}} C_1}{683 \cdot 4 K_{\text{гл}} \sigma T_{\text{цв}}^4 N_{\text{px}} N_{\text{py}}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{\text{цв}}}\right) - 1 \right]}, \quad (11)$$

где $K_{\text{гл}}$ — коэффициент использования глазом излучения.

Аппаратное ОСШ определяется так:

$$\mu = \frac{2 \left| \bar{N}_{\text{с}} - \bar{N}_{\text{диф}} - \bar{N}_{\text{фон}} \right|}{\sqrt{\bar{N}_{\text{с}} + \bar{N}_{\text{диф}} + \bar{N}_{\text{фон}}}}. \quad (12)$$

Оценка эффективности использования ЭОП в составе датчика волнового фронта АОС повышенной чувствительности (см. рис. 1) проводилась при следующих конструктивных параметрах и условиях работы ДФВ: цветовая температура $T_{\text{цв}} = 2700$ К; диффузно-отражающая поверхность равномерная с коэффициентом отражения $\rho = 0,3$; мощность лазерного источника излучения $P_{\text{л}} = 100$ Вт; угловая расходимость излучения лазера $2\omega_{\text{л}} = 2^\circ \times 2^\circ$ по уровню интенсивности $1/e^2$; угол световозвращения (определяется погрешностью изготовления трехгранного угла уголкового световозвращателя) $\gamma = 1''$; показатель световозвращения $R = 10$ м²/ср; локационная дистанция l (расстояние от осветительной системы двухканальной оптико-электронной локационной системы до объекта исследования — уголкового световозвращателя) 100...5000 м; диаметр входного зрачка афокальной системы приемного канала двухканальной оптико-электронной локационной системы $D_{\text{пр}} = 100$ мм.

Подставляя указанные конструктивные параметры ДФВ в формулы (3)–(11), определяем среднее число сигнальных фотоэлектронов, фоновых и обусловленных диффузно-отраженным излучением.

По результатам расчетов зависимости среднего числа сигнальных фотоэлектронов \bar{N}_c для заданных исходных данных от дальности расположения уголкового световозвращателя от плоскости регистрации ПЗС-матрицы для модифицированного ДВФ без применения ЭОП ($\eta = 1$) и с учетом коэффициента преобразования ЭОП ($\eta = 1 \cdot 10^4$) можно представить в виде графиков, приведенных на рис. 3.

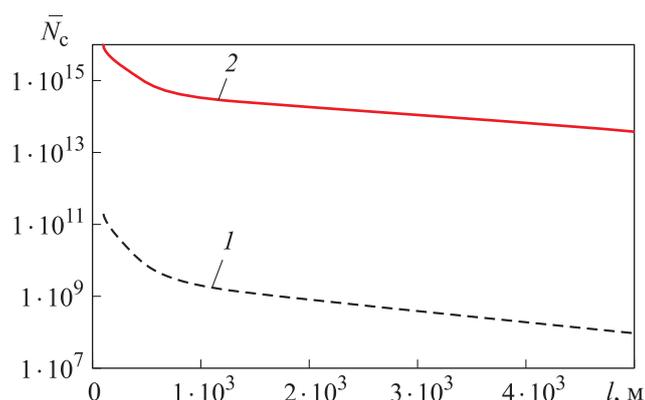


Рис. 3. Зависимости среднего числа сигнальных фотоэлектронов для одного элемента микролинзового растра в одной ячейке ПЗС-матрицы от дальности до световозвращателя:

1, 2 — коэффициенты преобразования ЭОП $\eta = 1$, $\eta = 1 \cdot 10^4$

Из рис. 3 следует, что применение ЭОП с заданным коэффициентом преобразования позволяет на четыре порядка увеличить число сигнальных фотоэлектронов.

Зависимости среднего числа фотоэлектронов, обусловленных диффузно-отраженным лазерным излучением, от дальности до световозвращателя без учета и с учетом влияния сильной турбулентности, приведены на рис. 4.

Согласно приведенным данным, зависимость средних чисел фотоэлектронов, обусловленных диффузно-отраженным лазерным излучением для одного элемента микролинзового растра в одной ячейке ПЗС-матрицы, от дальности до световозвращателя с учетом и без учета влияния сильной турбулентности, отличаются на пять порядков.

В результате светоэнергетического расчета получена функциональная зависимость ОСШ от дальности до световозвращателя для оптико-электронной системы с учетом коэффициента преобразования ЭОП $\eta_{ЭОП} = 1 \cdot 10^4$ (рис. 5).

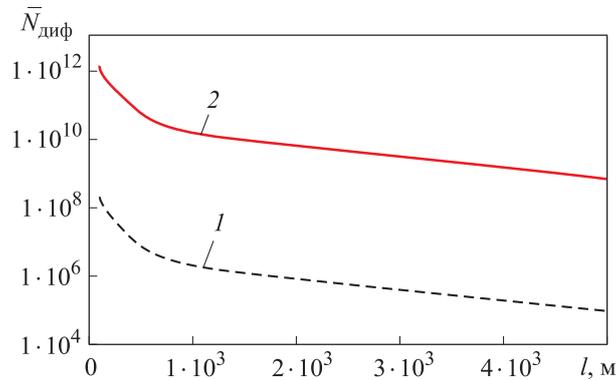


Рис. 4. Зависимости среднего числа фотоэлектронов, обусловленных диффузно-отраженным лазерным излучением, для одного элемента микролинзового раstra в одной ячейке ПЗС-матрицы от дальности до световозвращателя с учетом (1) и без учета (2) влияния сильной турбулентности, $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1/3}$

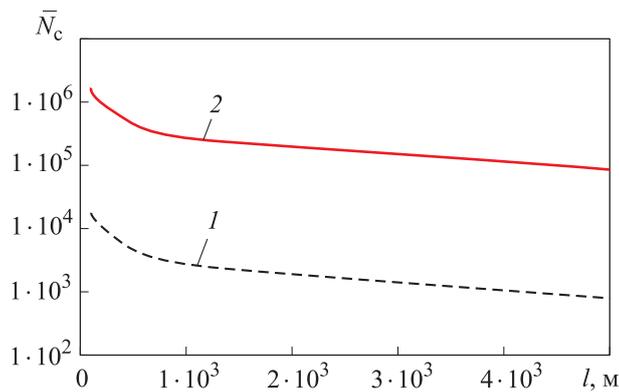


Рис. 5. Функциональная зависимость ОСШ от дальности до световозвращателя для оптико-электронной системы без ЭОП (1) и с ЭОП (2)

В результате сравнительного анализа значений аппаратных ОСШ пассивной оптико-электронной системы, работающей на горизонтальной атмосферной трассе, и активной локационной оптико-электронной системы на основе ЭОП (см. рис. 5), работающей на такой же горизонтальной трассе, выявлена возможность существенного увеличения ОСШ для активной локационной системы.

Вместе с тем использование ДВФ, сопряженного с ЭОП, в составе АОС имеет свои особенности, поскольку для корректной работы ДВФ в составе АОС необходима его калибровка, которая включает в себя точное определение положения раstra относительно плоскости фотоприемного модуля и получение референсной гартманограммы. Задача определения положения раstra решается в лабораторных условиях, так как для этого необходимо

угловое перемещение датчика в значительных пределах, что невозможно выполнить в условиях протяженной трассы. Референсная гартманограмма определяет начальные условия работы ДВФ и учитывает влияние дополнительных оптических элементов, входящих в состав АОС.

При работе на трассах с турбулентной атмосферой [17, 18] желательно периодически создавать новый референсный файл гартманограммы, что практически невозможно для обычных ДВФ из-за недостатка чувствительности. Однако при использовании усилителя яркости в составе ДВФ это становится возможным.

В силу особенностей современных ЭОП (разрешение, поворот изображения и др.) ужесточаются требования к калибровке такого ДВФ. Поэтому для инициализации работы ДВФ необходимо получить начальную гартманограмму в лабораторных условиях, где можно с очень высокой точностью создать плоский волновой фронт. Такая гартманограмма и станет первым референсным файлом.

В процессе экспериментальных исследований, связанных с получением первичной референсной гартманограммы, использованы несколько коллиматоров с постепенно увеличивающимся фокусным расстоянием. Коллиматор с фокусным расстоянием 400 мм был съюстирован по высококачественно сделанному зеркалу ($PV \leq \lambda/20$), как показано рис. 6, а. Положение сетки

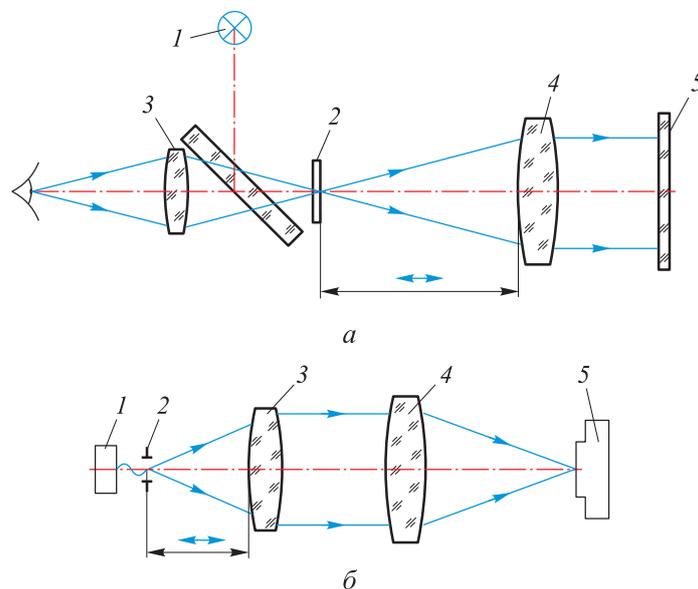


Рис. 6. Юстировка:

a — коллиматора (1 — осветитель; 2 — сетка; 3 — окуляр; 4 — объектив; 5 — зеркало);
б — длиннофокусного коллиматора (1 — лазер; 2 — волокно; 3 — объектив коллиматора; 4 — объектив видеокамеры; 5 — видеокамера)

этого коллиматора фиксировалось видеокамерой через объектив с фокусным расстоянием 1 м и с ее помощью точечный источник, представляющий собой волоконный лазер (диаметр сердцевины волокна составлял 3 мкм), устанавливался точно в фокусе коллиматора с фокусным расстоянием 1600 мм (юстировка последнего приведена на рис. 6, б) [19, 20]. В результате получен плоский волновой фронт, используемый для получения первичной референсной гартманогаммы (рис. 7).



Рис. 7. Скриншот референсного волнового фронта

В ходе калибровки получена референсная гартманогамма с минимальным отклонением от рассчитанной математически. Погрешность составила всего 6 нм RMS, т. е. это практически плоский волновой фронт. В программе датчика (см. рис. 7) такое распределение энергии в дальней зоне отображается как равномерная засветка.

Выводы. В результате анализа эффективности работы АОС в турбулентной атмосфере определены следующие факторы.

1. В условиях недостаточной естественной освещенности на горизонтальных и наклонных трассах дальность работы адаптивных систем сильно уменьшается при использовании обычных датчиков волнового фронта. Однако если ДВФ в составе имеет усилитель яркости (ЭОП), то дальность работы АОС значительно увеличивается, что определяется повышенным ОСШ.

2. Приведенный способ получения первичной референсной гартманогаммы позволяет настроить работу ДВФ с ЭОП в его составе с минимальными погрешностями.

Следовательно, использование ЭОП повышает энергетическую эффективность при работе АОС, что приводит к возможности работы на более протяженных трассах, а корректная настройка ведет к уменьшению погрешности.

Результаты, полученные в настоящей работе, доказывают увеличение чувствительности АОС, работающей в условиях недостаточной естественной освещенности на горизонтальной трассе по световозвращающему объекту, при использовании усилителя яркости в составе ДВФ, поскольку ОСШ существенно выше, чем для такой же АОС без усилителя яркости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A., et al. Hartmannometer versus Fizeau Interferometer: advantages and drawbacks. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9369, art. 936905. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2085263>
- [2] Platt B., Shack R.J. History and principles of Shack — Hartmann wavefront sensing. *J. Refract. Surg.*, 2001, vol. 17, no. 5, pp. 573–577. DOI: <https://doi.org/10.3928/1081-597X-20010901-13>
- [3] Primot J. Theoretical description of Shack — Hartmann wavefront sensor. *Opt. Commun.*, 2003, vol. 222, no. 1-6, pp. 81–92. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01565-7](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01565-7)
- [4] Babcock H.W. The possibility of compensating atmospheric seeing. *PASP*, 1953, vol. 65, no. 368, pp. 229–236. DOI: <https://doi.org/10.1086/126606>
- [5] Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М., Наука, 1967.
- [6] Tyson R.K. Principles of adaptive optics. New York, Academic Press, 1998.
- [7] Шанин О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М., Техносфера, 2013.
- [8] Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика в приборах и устройствах. М., ЦНИИАтоминформ, 2005.
- [9] Cornelissen S., Hartzell A., Stewart J., et al. MEMS deformable mirrors for astronomical adaptive optics. *1st AO4ELT Conf. — Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes*, 2010, art. 06003. DOI: <https://doi.org/10.1051/ao4elt/201006003>
- [10] Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., et al. Focusing of a laser beam passed through a moderately scattering medium using phase-only spatial light modulator. *Photonics*, 2022, vol. 9, no. 5, art. 296. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics9050296>
- [11] Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск, Наука, 1986.
- [12] Soloviev A., Kotov A., Perevalov S., et al. Adaptive system for wavefront correction of the PEARL laser facility. *Quantum Electron.*, 2022, vol. 50, no. 12, pp. 1115–1122. DOI: <https://doi.org/10.1070/QEL17446>

- [13] Segel M., Zepp A., Anzuola E., et al. Optimization of wavefront-sensorless adaptive optics for horizontal laser beam propagation in a realistic turbulence environment. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10408, art. 104080E. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2276240>
- [14] Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
- [15] Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М., Университетская книга, Логос, 2011.
- [16] Holst G. Electro-optical imaging system performance. Washington, SPIE Optical Engineering Press, 2003.
- [17] Hatheway A.E., ed. Actuator technology and application. *Inter. Symp. Optical Sc., Eng., Instr.*, 1996, vol. 2865.
- [18] Харди Д.У. Активная оптика: новая техника управления световым пучком. *ТИИЭР*, 1978, т. 66, № 6, с. 31–85.
- [19] Трубицина Е.В., Животовский И.В., Сахаров А.А. Юстировка прибора с датчиком волнового фронта с использованием точностных характеристик датчика. *Контенант*, 2019, № 3-2, с. 50–62.
- [20] Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Джумамуратова А.А. и др. Разработка и исследование оптико-электронного прибора на основе датчика волнового фронта для контроля параметров формы интраокулярных линз. *Измерительная техника*, 2019, № 1, с. 27–30. DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-1-27-30>

Сахаров Алексей Александрович — ведущий инженер кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Животовский Илья Вадимович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Карасик Валерий Ефимович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Мухина Елена Евгеньевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сахаров А.А., Животовский И.В., Карасик В.Е. и др. Методика повышения энергетической эффективности адаптивной оптической системы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 4 (149), с. 76–91.

EDN: ULBDDF

TECHNIQUE TO INCREASE THE ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM ENERGY EFFICIENCY

A.A. Sakharov
I.V. Zhivotovsky
V.E. Karasik
E.E. Mukhina

smx@bmstu.ru
ivj@bmstu.ru
karassik@bmstu.ru
emuhina@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents methodology for the light and energy computation of a wavefront sensor with the brightness amplifier and a technique to obtain a primary hartmanogram with minimum error for such a sensor. Requirements for technical characteristics of the video cameras used in the adaptive optical systems are analyzed, and the key requirements for them are discussed. The paper shows necessity and advantages of using the electron-image tube as part of a wavefront sensor. It provides the signal/noise ratio computation for sensors based on the high-speed video cameras with and without a brightness amplifier. The calculations reveal that introducing an electron-image tube in the adaptive optical systems used in the horizontal routes significantly increases their operation range. It is shown that the developed technique of light and energy computation identifies advantages of the adaptive optical systems with wavefront sensors based on the electron-image tube. The method for obtaining a reference hartmanogram makes it possible to receive a wavefront with a minimum error relative to the mathematically computed ideal. The paper notes that the presented study results indicate a possibility of obtaining a reference hartmanogram under conditions close to operation in routes with increased turbulence, which improves the adaptive optical system quality

Keywords

Adaptive optics, electron-image tube, wavefront sensor, turbulence, atmosphere optics, light and energy computation, micro-lens raster

Received 11.12.2023

Accepted 04.03.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A., et al. Hartmannometer versus Fizeau Interferometer: advantages and drawbacks. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9369, art. 936905. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2085263>

- [2] Platt B., Shack R.J. History and principles of Shack — Hartmann wavefront sensing. *J. Refract. Surg.*, 2001, vol. 17, no. 5, pp. 573–577.
DOI: <https://doi.org/10.3928/1081-597X-20010901-13>
- [3] Primot J. Theoretical description of Shack — Hartmann wavefront sensor. *Opt. Commun.*, 2003, vol. 222, no. 1-6, pp. 81–92.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01565-7](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01565-7)
- [4] Babcock H.W. The possibility of compensating atmospheric seeing. *PASP*, 1953, vol. 65, no. 368, pp. 229–236. DOI: <https://doi.org/10.1086/126606>
- [5] Tatarskiy V.I. Rasprostraneniye voln v turbulentsnoy atmosfere [Wave propagation in a turbulent atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1967.
- [6] Tyson R.K. Principles of adaptive optics. New York, Academic Press, 1998.
- [7] Shanin O.I. Adaptivnye opticheskie sistemy korrektsii naklonov. Rezonansnaya adaptivnaya optika [Adaptive optical systems for tilt correction. Resonant adaptive optics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013.
- [8] Taranenko V.G., Shanin O.I. Adaptivnaya optika v priborakh i ustroystvakh [Adaptive optics in instruments and devices]. Moscow, TsNIIatominform Publ., 2005.
- [9] Cornelissen S., Hartzell A., Stewart J., et al. MEMS deformable mirrors for astronomical adaptive optics. *1st AO4ELT Conf. — Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes*, 2010, art. 06003. DOI: <https://doi.org/10.1051/ao4elt/201006003>
- [10] Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., et al. Focusing of a laser beam passed through a moderately scattering medium using phase-only spatial light modulator. *Photonics*, 2022, vol. 9, no. 5, art. 296. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics9050296>
- [11] Lukin V.P. Atmosfernaya adaptivnaya optika [Atmospheric adaptive optics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986.
- [12] Soloviev A., Kotov A., Perevalov S., et al. Adaptive system for wavefront correction of the PEARL laser facility. *Quantum Electron.*, 2022, vol. 50, no. 12, pp. 1115–1122.
DOI: <https://doi.org/10.1070/QEL17446>
- [13] Segel M., Zepp A., Anzuola E., et al. Optimization of wavefront-sensorless adaptive optics for horizontal laser beam propagation in a realistic turbulence environment. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10408, art. 104080E. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2276240>
- [14] Karasik V.E., Orlov V.M. Lokatsionnye lazernye sistemy videniya [Localization laser vision systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013.
- [15] Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. Dvukh- i mnogodiapazonnye optikoelektronnye sistemy s matrichnymi priemnikami izlucheniya [Two- and multi-band optoelectronic systems with matrix radiation receivers.]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., Logos Publ., 2011.
- [16] Holst G. Electro-optical imaging system performance. Washington, SPIE Optical Engineering Press, 2003.
- [17] Hatheway A.E., ed. Actuator technology and application. *Inter. Symp. Optical Sc., Eng., Instr.*, 1996, vol. 2865.

[18] Khardi D.U. Active optics: a new light beam control technique. *TIIER*, 1978, vol. 66, no. 6, с. 31–85 (in Russ.).

[19] Trubitsina E.V., Zhivotovskiy I.V., Sakharov A.A. Adjustment of device with wavefront sensor using accuracy characteristics of wavefront sensor. *Contentant*, 2019, no. 3-2, pp. 50–62 (in Russ.).

[20] Baryshnikov N.V., Denisov D.G., Dzhumamuratova A.A., et al. Development and research of an optoelectronic device based on a wavefront sensor to control the form parameters of intraocular lenses. *Meas. Tech.*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 31–35.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01581-6>

Sakharov A.A. — Lead Engineer, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Zhivotovsky I.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Karasik V.E. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Mukhina E.E. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sakharov A.A., Zhivotovsky I.V., Karasik V.E., et al. Technique to increase the adaptive optical system energy efficiency. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 4 (149), pp. 76–91 (in Russ.). EDN: ULBDDF