

УДК 535.375:551.521

Д.А. Безуглов, И.А. Сахаров**АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА**

При создании адаптивных оптических систем волнового сопряжения проводят косвенные измерения фазы на апертуре адаптивной оптической, затем эти измерения одним из численных методов пересчитывают в базис функций отклика гибкого зеркала. При этом каждому из известных алгоритмов, как правило, присущи свои достоинства и недостатки, однако конечные характеристики разрабатываемых на их основе датчиков волнового фронта зависят от конкретной технической реализации последних.

В работе впервые предложен новый пространственно-временной метод и алгоритм восстановления волнового фронта датчиками радиального, тангенциального и гибридного типов, позволяющие измерять локальные наклоны в течение заданного момента времени и сделать вывод об искажениях в последующий момент. Полученные результаты используются для реконструкции волнового фронта. Получены аналитические выражения. Проведено численное моделирование восстановления волнового фронта пространственно-временными алгоритмами. Предложен новый метод реконструкции волнового фронта в режиме реального времени, а также учтена связь декартовой и полярной систем координат. Это позволило существенно повысить точностные характеристики восстановления волнового фронта.

Анализ результатов показал, что предложенный подход позволяет существенно повысить точность восстановления волнового фронта и снизить математические затраты.

Реконструкция волнового фронта; полиномы Цернике; датчик фазового фронта; адаптивная оптика.

D.A. Bezuglov, I.A. Sakharov**ANALYSIS OF THE SPACE-TIME RECOVERY ALGORITHMS WAVEFRONT**

When you create an adaptive optical systems of wave pairing conduct indirect measurements of the phase at the aperture adaptive optics, then the measurement is one of numerical methods to recalculate the basis of the response function of flexible mirrors. Thus, each of the known algorithms, as a rule, has its own advantages and disadvantages but the final characteristics of the developed based on these sensors wavefront depend on the specific technical implementation of the latter.

For the first time proposed a new space-time method and algorithm of restoring wavefront sensors radial, tangential and hybrid type, allowing for the measurement of local slopes within a given moment of time and make a conclusion about the distortions in the next moment. The results are used to wavefront reconstruction. Analytical expressions. Numerical simulation of recovery of the wave front for space-time algorithms. A new method of wavefront reconstruction in real time, and also taken into account the relationship of the Cartesian and polar systems of coordinates. This will significantly improve the accuracy characteristics of the reconstruction of the wave front.

Analysis of the results showed that the proposed approach allows to significantly increase the accuracy of the recovery of the wave front and reduce mathematical costs.

Wavefront reconstruction; phase front sensor; adaptive optics.

Введение. Одним из наиболее эффективных способов ослабления возмущающего действия атмосферы на работу оптической системы является применение адаптивных методов и систем. Идеи, положенные в основу создания адаптивных систем, предложены сравнительно недавно [1].

При создании адаптивных оптических систем волнового сопряжения проводят, как правило [2, 3], косвенные измерения волнового распределения на апертуре адаптивной оптической системы. Затем эти измерения одним из численных мето-

дов пересчитывают в базис функций отклика гибкого зеркала. При этом каждому из известных алгоритмов, как правило, присущи свои достоинства и недостатки, однако конечные характеристики разрабатываемых на их основе датчиков волнового фронта зависят от конкретной технической реализации последних. В связи с этим интерес к дальнейшему совершенствованию таких устройств не ослабевает.

Цель работы: разработка пространственно-временного метода и алгоритма восстановления волнового фронта датчиками радиального, тангенциального и гибридного типов, позволяющего измерять локальные наклоны в течение заданного момента времени и сделать вывод об искажениях в последующий момент.

Алгоритм восстановления волнового фронта. Хорошо известный гартмановский тест [1], предложенный первоначально для контроля телескопической оптики, был в дальнейшем использован для адаптивной оптики и является наиболее часто применяемым типом датчика волнового фронта.

Следует отметить, что универсальным разложением волнового фронта, отвечающим ряду условий оптимальности, является разложение Карунена–Лоэва [1]. Оно характеризуется следующими свойствами, обуславливающими его оптимальность: минимальной среднеквадратической ошибкой при удержании заданного числа членов в бесконечном ряде разложения, получением наибольшего по сравнению с любым другим разложением количества информации о представляемой усеченным рядом функции, какое бы число членов ряда ни удерживалось, а также некоррелированностью коэффициентов разложения, что упрощает дальнейшее использование результатов разложения и их анализ. Однако в силу того, что аналитическое такое разложение трудно представимо, для практических целей обычно [1] используют систему полиномов Цернике, достаточно близких к ним.

Для аппроксимации функций отклика гибкого адаптивного зеркала [4] используем систему полиномов Цернике, ортогональных (ортонормированных) внутри единичной окружности или окружности радиусом R , представленных в полярных координатах r, θ [1, 5]:

$$Z_j(r, \theta) = \begin{cases} \sqrt{n+1}R_n^m(r)\sqrt{2} \cos m\theta & \text{для чётных полиномов и } m \neq 0, \\ \sqrt{n+1}R_n^m(r)\sqrt{2} \sin m\theta & \text{для нечётных полиномов и } m \neq 0, \\ \sqrt{n+1}R_n^0(r) & \text{для } m = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\int_0^{2\pi} \int_0^1 Z_j(r, \theta) Z_j(r, \theta) dr d\theta = \delta_j,$$

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! r^{n-2s}}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!}.$$

Величины n и m всегда целые и удовлетворяют условию $n \geq m$, $n - |m| = \text{чётно}$. Индекс j является порядковым номером моды и зависит от n и m . Условие ортогональности в круге единичного радиуса имеет вид

$$W(r) = \begin{cases} 1/\pi & \text{при } |r| \leq 1 \\ 0 & \text{при } |r| > 1 \end{cases}, \quad (2)$$

где δ_j – символ Кронекера.

Волновой фронт, измеренный датчиком, в базисе Цернике имеет следующий вид:

$$\Phi_{изм}(r, \theta) = \sum_{j=1}^N Z_j(r, \theta) c_j, \quad (3)$$

где c_j – коэффициенты разложения волнового фронта по полиномам Цернике (сигналы с выхода датчика волнового фронта), число полиномов N в разложении определяют с помощью выражения:

$$N = \left\lceil \left(\frac{-0,2944(D/r_0)^{5/3}}{\ln St} \right)^{\frac{2}{\sqrt{3}}} \right\rceil, \quad (4)$$

где D – диаметр апертуры, r_0 – радиус когерентности, St – число Штреля.

В используемом методе подлежат измерению не локальные наклоны в плоскостях x и y , пропорциональные соответствующим производным, а тангенциальные локальные наклоны, пропорциональные величинам вида $\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial \theta}$ и радиальные наклоны, пропорциональные соответственно величинам вида, $\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial r}$, $i = \overline{1, M}$. Для измерения этих величин предлагается использовать двухплощадные фотоприемники, расположенные в точках апертуры на концентрических окружностях, при этом граница раздела двухплощадных фотоприемников совпадает с радиусом соответствующей окружности или перпендикулярна ему [6, 7, 8, 9, 10].

Измерения локальных наклонов в течение заданного момента времени позволяют сделать вывод об искажениях в последующий момент и полученные результаты использовать при реконструкции волнового фронта [11, 12, 13].

Для реконструкции фазы применим метод наименьших квадратов. Соответствующая квадратичная форма метода наименьших квадратов в этом случае будет иметь следующий вид:

$$J = \sum_{i=0}^F \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial \theta} - \frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial \theta} - \frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \right)^T + \sum_{i=F}^M \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial r} - \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r} \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial r} - \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r} \right)^T, \quad (5)$$

где M – общее число точек измерений волнового фронта (фотоприемников), F – число точек измерений тангенциальных локальных наклонов.

Выражения для истинных значений градиента фазы можно представить в следующем виде:

- ♦ для тангенциальных значений:

$$\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \sum_{j=1}^N a_j Z_j(r_i, \theta_i) = \sum_{j=1}^N a_j \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta}, \quad (6)$$

- ♦ для радиальных значений аналогично:

$$\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \sum_{j=1}^N a_j Z_j(r_i, \theta_i) = \sum_{j=1}^N a_j \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r}.$$

Для вычисления в явном виде значений выражения (6) следует использовать в выражении (1). Подставив (6) в (5), получим:

$$J_1 = \sum_{i=0}^F \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial \theta} - \sum_{j=1}^N a_j \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial \theta} - \sum_{k=1}^N a_k \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \right)^T + \quad (7)$$

$$+ \sum_{i=F}^M \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial r} - \sum_{j=1}^N a_j \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r} \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial r} - \sum_{k=1}^N a_k \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r} \right)^T.$$

Значения коэффициентов a_j найдем из M линейных уравнений, приравняв к нулю частные производные квадратичной формы J по a_j :

$$\frac{\partial J}{\partial a_j} = 0; \quad B \cdot A = C, \quad (8)$$

где B – матрица с коэффициентами

$$b_{k,j} = \sum_{i=0}^F \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} \frac{\partial Z_k(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} + \sum_{i=F}^M \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r} \frac{\partial Z_k(r_i, \theta_i)}{\partial r};$$

A – вектор-строка искомых коэффициентов полиномов Цернике a_j ; C – вектор-столбец правой части

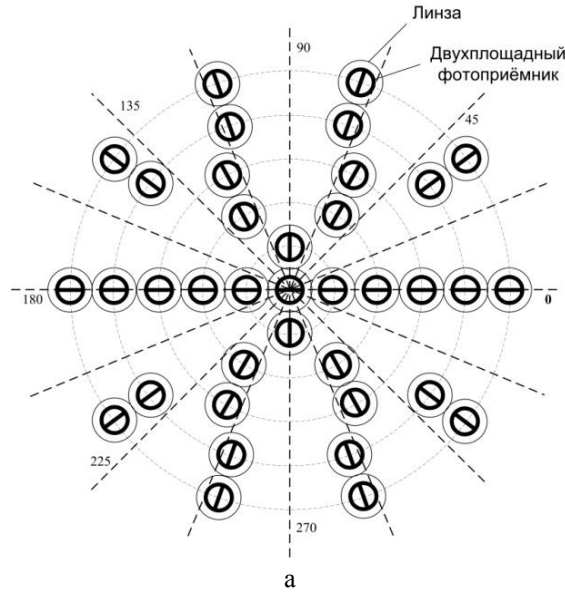
$$c_j = \sum_{i=0}^M \frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial \theta} \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial \theta} + \sum_{i=0}^M \frac{\partial \Phi(r_i, \theta_i)_{uzm}}{\partial r} \frac{\partial Z_j(r_i, \theta_i)}{\partial r}, \quad k, j = 1, N.$$

Решение системы (8) будет иметь следующий вид:

$$A = B^{-1} \cdot C \quad (9)$$

Следует отметить, что как показали исследования, структура матрицы B^{-1} (местоположение в ней нулевых и ненулевых элементов) остается неизменной при произвольном выборе точек расположения двухплощадных фотоприемников. При этом изменяются только значения этих элементов [9, 10].

При проведении оценки эффективности адаптивных оптических систем на фоне гауссовских шумов следует учитывать расположение датчиков в точках апертуры на концентрических окружностях датчиков (рис. 1 а,б), а при смешанном (гибридном) расположении датчиков в соответствии с рис. 2 [6, 7].



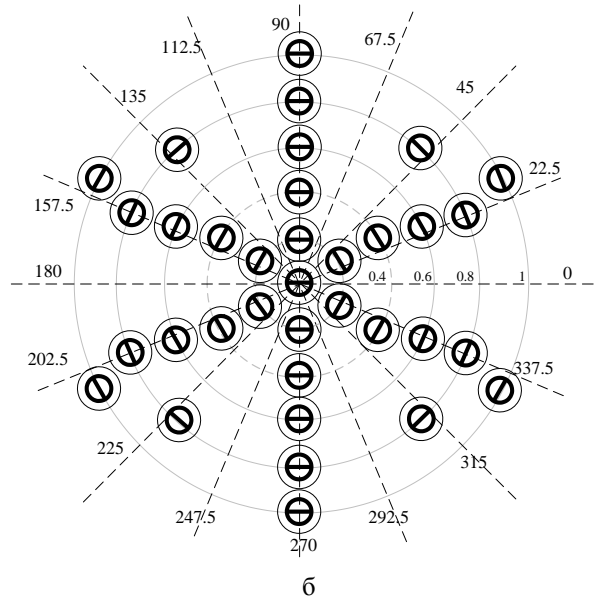


Рис. 1. Расположение датчиков на апертуре (а – тангенциальное, б – радиальное)

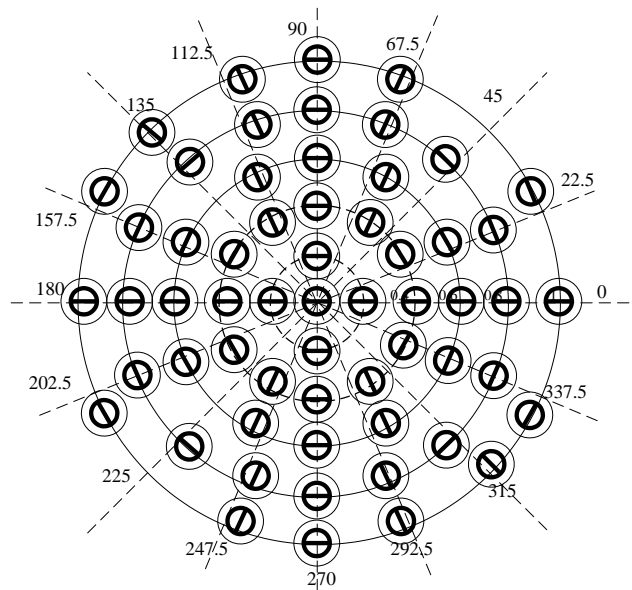


Рис. 2. Гибридное оптимизированное расположение датчиков

В работе проведено численно-аналитическое моделирование восстановления волнового фронта пространственно-временными алгоритмами. Исследована зависимость дисперсии ошибки пространственно-временного алгоритма восстановления волнового фронта для датчиков: D_G – гибридного, D_R – радиального, D_T – тангенциального типов, D_{sh} – гибридного типа без пространственно-временной составляющей от СКО формирующих шумов σ в каналах датчика для топологии (рис. 1,а,б и рис. 2).

Результаты исследования приведены на рис. 3 и подтверждены свидетельствами на программные продукты [11, 12, 13]. Анализ результатов показал, что предложенный вариант топологии позволяет существенно повысить точность восстановления волнового фронта и снизить временные затраты.

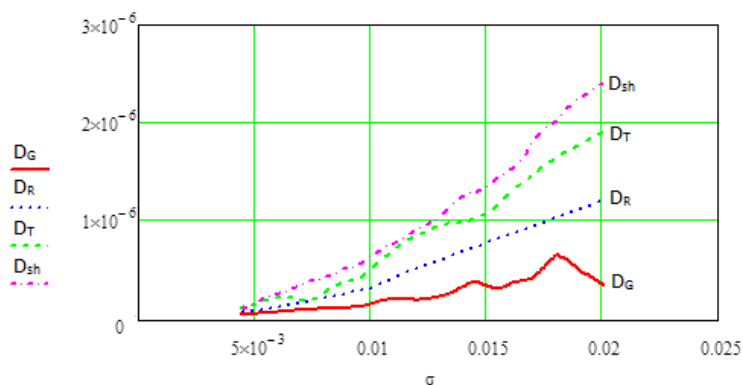


Рис. 5. Дисперсия ошибки восстановления волнового фронта

Выводы. Разработаны пространственно-временной алгоритм и метод восстановления волнового фронта датчиками радиального, тангенциального и гибридного типов, позволяющие существенно повысить точностные характеристики датчика волнового фронта за счет прогнозирования изменения в искажениях в последующий момент времени, полученные результаты использовать при реконструкции волнового фронта. Анализ результатов показал, что предложенный вариант позволяет существенно повысить точность восстановления волнового фронта и снижает математические затраты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985. – 336 с.
2. Безуглов Д.А., Мищенко Е.Н. Метод сплайн-аппроксимации в задаче восстановления волнового фронта // Известия РАН. Серия физическая. – 1992. – № 12. – С. 156-160.
3. Безуглов Д.А., Мищенко Е.Н., Мищенко С.Е. Адаптивные оптические системы. Методы восстановления волнового фронта, разработка структур систем и новой элементарной базы // Оптика атмосферы и океана (обзор). – 1995. – № 3. – С. 364-380.
4. А.с. 1720051 СССР, МКИ5 G 02 В 26/06. Датчик волнового фронта / Безуглов Д.А., Мищенко Е.Н., Крымский М.И., Серпенинов О.В. Опубл. в БИ. 1992. № 10.
5. Noll R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Amer. – 1976. – Vol. 66. – P. 207-211.
6. Безуглов Д.А., Сахаров И.А. Свидетельство №2008610021 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 09.01.2007 «Алгоритм оптимизации топологии датчика фазового фронта».
7. Безуглов Д.А., Сахаров И.А., Решетникова И.В. Метод оптимизации топологии датчика фазового фронта // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 11. – С. 998-1003.
8. Безуглов Д.А., Сахаров И.А., Решетникова И.В. Оптимизации топологии датчика волнового фронта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3 (80). – С. 140-149.
9. Безуглов Д.А., Забродин Р.А., Миронович Д.В., Решетникова И.В., Сахаров И.А. Тангенциальный датчик фазового фронта. Патент на изобретение RUS 2365956 26.12.2007.
10. Безуглов Д.А., Решетникова И.В., Сахаров И.А. Датчики фазового фронта: Монография; Ростовская акад. сервиса (фил.), ГОУ ВПО "Южно-Российский гос. ун-т экономики и сервиса" (РАС ЮРГУЭС). – Ростов-на-Дону, 2007.

11. *Безуглов Д.А., Сахаров И.А.* Пространственно временной алгоритм восстановления фазового фронта для датчика радиального типа. Свидетельство об официальной регистрации в Роспатенте программы для ЭВМ №2011613984 от 23.05.2011.
12. *Безуглов Д.А., Сахаров И.А.* Пространственно временной алгоритм восстановления фазового фронта для датчика тангенциального типа. Свидетельство об официальной регистрации в Роспатенте программы для ЭВМ №2011613985 от 23.05.2011.
13. *Безуглов Д.А., Сахаров И.А.* Пространственно временной алгоритм восстановления фазового фронта для датчика гибридного типа. Свидетельство об официальной регистрации в Роспатенте программы для ЭВМ №2011613986 от 23.05.2011.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Костоготов.

Безуглов Дмитрий Анатольевич – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Донской государственный технический университет”; e-mail: bezuglovda@mail.ru; 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; тел.: 89185548454; кафедра информационных технологии в сервисе; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Сахаров Иван Александрович – e-mail: sakharov.i.a@yandex.ru; тел.: 89034735847; кафедра информационных технологии в сервисе; старший преподаватель.

Bezuglov Dmitry Anatolievich – Federal State Educational Institution of Higher Professional Education of the Don State Technical University; e-mail: bezuglovda@mail.ru; 1, Gagarina pl., Rostov-on-Don, 344000, Russia; phone: +79185548454; the department of information technologies in the service of; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Sakharov Ivan Aleksandrovich – e-mail: sakharov.i.a@yandex.ru; phone: +79034735847; the department of information technologies in the service of; senior teacher.

УДК 621.311.6

В.Т. Лобач, С.А. Гросуль

УДЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ РАССЕЙНИЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Перспективным направлением неконтактного исследования параметров водной поверхности является полупассивная двухпозиционная радиолокация. В ее основе лежит прием отраженного от водной поверхности сигнала, источник которого находится в значительном пространственном удалении от точки приема. Одним из факторов, определяющих характер воздействия водной поверхности на отраженный радиосигнал, является удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) и ее зависимость от геометрии задачи, высоты морских волн (скорости ветра над водной поверхностью) и длины волны радиосигнала. Знание функциональной зависимости УЭПР от названных параметров позволяет решать обратную задачу – измерения параметров морского волнения. Настоящая статья посвящена решению такой задачи.

Эффективная площадь рассеяния; водная поверхность; двухпозиционная радиолокация; параметры морского волнения.

V.T. Lobach, S.A. Grosul

SPECIFIC EFFECTIVE AREA OF DIFFUSING OF THE WATER TABLE AT ON-OFF RADIOLOCATION

Perspectiv direction of not contact research of parameters of a water table is the semi-active on-off radiolocation. In its basis reception of the reflected from a water table of a signal which source is in significant space distance from a point of reception lays. One of the factors determin-