

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АДАПТИВНОГО ЗЕРКАЛА

В. А. Зверев, С. А. Родионов и М. Н. Сокольский

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяется разработке адаптивных оптических систем – систем с возможностью управления формой волнового фронта. Направление адаптивной оптики охватывает решение различных технических задач, общим для которых является необходимость приведения волнового фронта к некоторой оптимальной форме. Развитие астрономических исследований, совершенствование навесной аппаратуры для их выполнения, а также применение лазерной техники для этой и других целей определяют тот повышенный интерес, который проявляется сегодня к адаптивной оптике. Как показывает анализ литературы [1, 2], интерес этот определяется: 1) возможностью увеличения размеров оптических систем, например астрономических телескопов, за пределы, ограниченные технологией изготовления обычных зеркал; 2) предполагаемой возможностью уменьшения веса главных зеркал, влияния температурных перепадов на форму поверхности; 3) возможностью управления формой поверхности для исключения влияния неоднородности атмосферы, тепловых деформаций элементов конструкции, ошибок установки оптических элементов, компенсации погрешностей разгрузочных устройств и т. д.

Одну из основных и наиболее общую разновидность адаптивной оптики представляет, собой зеркало, принципиально реализованное в виде двух модификаций. К первой модификации относятся, сплошные, так называемые активные зеркала на упругой основе, допускающие локальные деформации формы отражающей поверхности в процессе работы системы. Вторая модификация – это синтезированное зеркало, собранное из системы малых зеркал, при этом принято считать, что большая апертура полностью заполняется прилегающими друг к другу малыми апертурами, а волновые фронты, создаваемые малыми зеркалами, синфазны и образуют единый волновой фронт суммарной апертуры. В этом случае качество оптической системы определяется суммарной апертурой.

При создании адаптивного зеркала приходится сталкиваться со многими проблемами. Это прежде всего проблемы создания высокоточных оптико-электронных систем автоматического управления, аппаратуры контроля формы поверхности в реальном масштабе времени, системы исполнительных механизмов и др. Требования к конструкции адаптивного зеркала, системы контроля и управления его формой определяются требованиями к форме и величине допустимого остаточного дефазирования, к точности изготовления и установки элементов синтезированных зеркал. Поэтому теоретически обоснованное определение допусков на отступление формы поверхности от идеальной приобретает важнейшее значение и определяет конструкцию в целом адаптивного зеркала.

Для первой модификации адаптивного зеркала – гибкого зеркала – погрешности отработки формы поверхности приводят к возникновению местных деформаций волнового фронта и изменению структуры оптического изображения. Анализ влияния формы поверхности на качество изображения для этого случая нами исследован в процессе изготовления крупногабаритной оптики [3, 4]. Результаты этих исследований могут быть использованы для определения требований к точности управления формой поверхности гибкого зеркала.

Оптические системы второй модификации – синтезированные адаптивные системы – представляют наибольший интерес, поскольку практическое их осуществление наиболее реально. Исследованию влияния ошибок изготовления и установки элементов синтезированной системы на качество оптического изображения, теоретически обоснованный расчет требований к точности изготовления и установки элементов посвящена настоящая работа.

1. Структура изображения в системах с синтезированной апертурой

Рассмотрим структуру оптического изображения с синтезированным зеркалом. Отметим, что из-за разрывного характера зрачковой функции геометрическая теория не применима к нашему случаю и все эффекты должны быть рассмотрены на основе теории дифракции.

Как известно, структура оптического изображения, описываемая, например, функцией рассеяния точки $h(r)$, выражается через квадрат модуля преобразования Фурье F зрачковой функции $f(\rho)$, описывающей распределение амплитуды и фазы на зрачке [5]:

$$h(r) = C|F[f(\rho)]|^2 \quad (1.1)$$

где C – нормирующий множитель, r – вектор канонических координат на плоскости изображения (выраженных в длинах волн, деленных на апертуру), ρ – вектор канонических координат на зрачке. Зрачковая функция определяется следующим соотношением:

$$f(\rho) = \Omega_0 \tau^{1/2}(\rho) \exp[2\pi i W(\rho)] \quad (1.2)$$

где $\tau(\rho)$ – коэффициент энергетического пропускания (в дальнейшем примем $\tau = 1$), $W(\rho)$ – функция волновой аберрации, Ω_0 – единично-нулевая функция области зрачка в канонических координатах.

Для системы с синтезированной апертурой Ω_0 состоит из N отдельных элементов Ω_k . Поэтому $f(\rho)$ удобно представить в виде

$$f(\rho) = \sum_{k=1}^N \rho_{0k} f_k(\rho_k) \quad (1.3)$$

где $f(\rho_k)$ – зрачковая функция k -го элемента, выраженная в координатах ρ_k относительно центра этого элемента;

$$\rho_k = \frac{\rho - \rho_{ck}}{\rho_{0k}} \quad (1.4)$$

(\mathbf{r}_{ck} – вектор координат центра k -го элемента в общей системе канонических координат, \mathbf{r}_{0k} – половина размера k -го элемента в этой же системе координат). Тогда в соответствии с (1.1) и со свойствами Фурье-преобразования получим

$$h(\mathbf{r}) = C \left| \sum_{k=1}^N \mathbf{r}_{0k}^2 \exp[2\pi i \mathbf{r}^T \mathbf{r}_{ck}] \tilde{f}_k(\mathbf{r} \mathbf{r}_{0k}) \right|^2 \quad (1.5)$$

где t – индекс транспонирования, $\tilde{f}_k(\mathbf{r} \mathbf{r}_{0k})$ – Фурье-образ зрачковой функции k -го элемента в своих координатах.

Пусть форма всех элементов одинакова. Тогда

$$f_k(\mathbf{r}_k) = \Omega_k \exp[2\pi i W_k(\mathbf{r}_k)] \quad (1.6)$$

где Ω_k – единично-нулевая функция элемента зрачка. Волновую aberrацию $W_k(\mathbf{r}_k)$, вносимую k -м элементом, удобно представить в виде суммы членов, зависящих от юстировки элемента и от погрешности формы его поверхности:

$$W_k(\mathbf{r}_k) = a_{00k} + a_{20k} \|\mathbf{r}_k\|^2 + \mathbf{a}_{11k}^T \mathbf{r}_k + \sum_{j=3}^{\infty} q_{kj} P_j(\mathbf{r}_k) \quad (1.7)$$

где a_{00k} – постоянная составляющая (дефазировка), a_{20k} , $\mathbf{r}_k^T \mathbf{r}_k$ – квадратичный член (дефокусировка), $\mathbf{a}_{11k}^T \mathbf{r}_k$ – линейный член (поперечное смещение, наклон),

$$\mathbf{a}_{11k}^T \mathbf{r}_k = a_{11x} \mathbf{r}_k \cos \varphi_k + a_{11y} \mathbf{r}_k \sin \varphi_k$$

(a_{11x} , a_{11y} – проекции коэффициента волновой aberrации смещения на осях x , y ; \mathbf{r}_k , φ_k – полярные координаты точки на элементе). Коэффициенты a_{00k} , a_{20k} , a_{11x} , a_{11y} выражаются через смещения элементов Δl_k в продольном направлении, углы наклона θ_x , θ_y – следующими формулами:

$$a_{00k} = \frac{\Delta l_k (n' - n)}{\lambda}, \quad a_{20k} = \frac{\Delta l_k}{4\lambda} \left[\frac{A_k'^2}{n'} - \frac{A_k^2}{n} \right], \quad (1.8)$$

$$a_{11x} = \frac{\theta_x D_k}{2\lambda} (n' - n), \quad a_{11y} = \frac{\theta_y D_k}{2\lambda} (n' - n).$$

где n' , n – показатели преломления сред, разделенных поверхностью элемента; A_k' , A_k – угловые апертуры элемента в пространстве изображения и предмета; D_k – размер k -го элемента (в мм) для бесконечно удаленного предмета. Для зеркально отражающего элемента $n' = -n$. Тогда

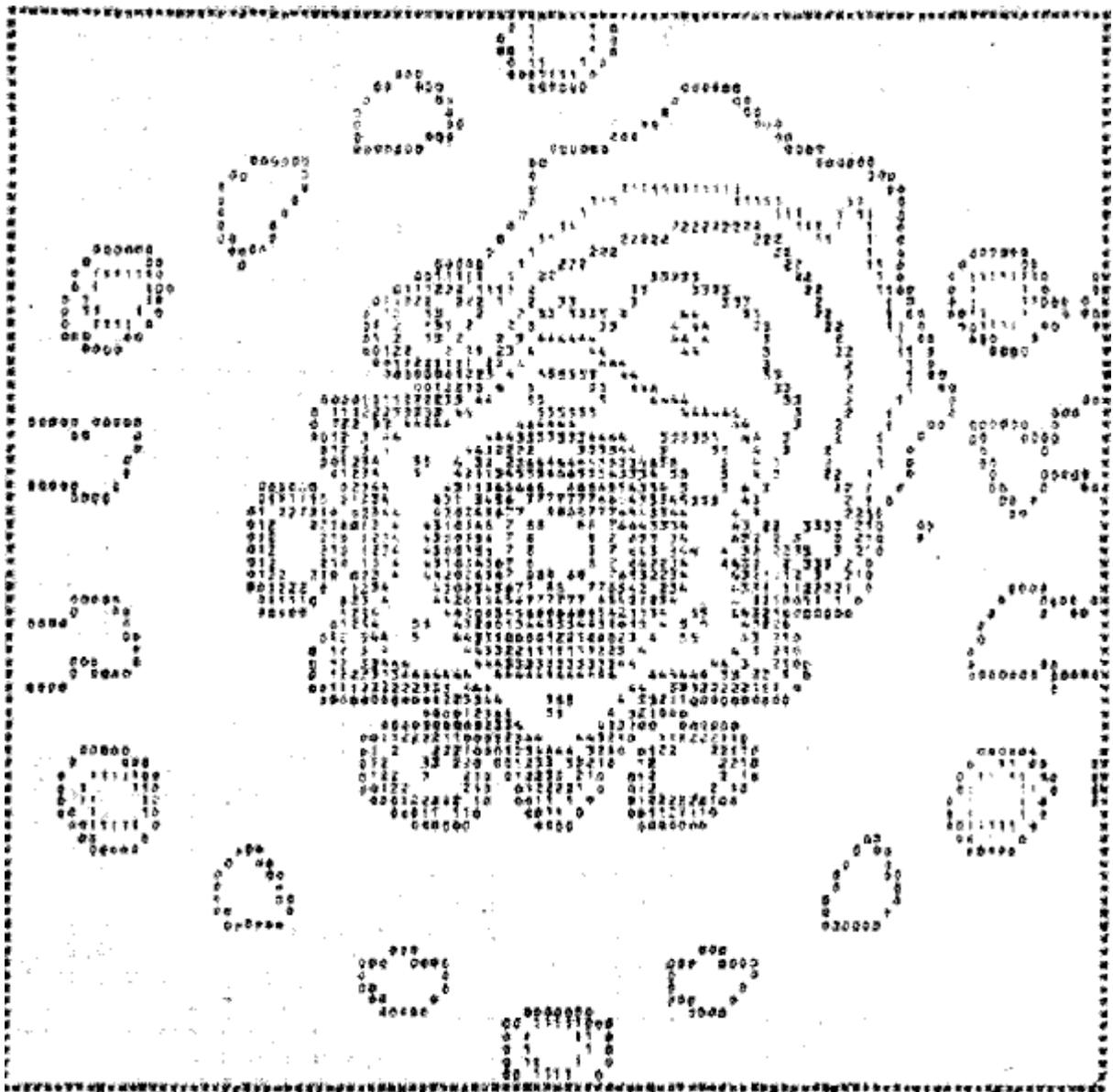
$$a_{00k} = \frac{2\Delta l_k}{\lambda}, \quad a_{20k} = \frac{\Delta l_k A_k'^2}{4\lambda} = \frac{a_{00k} A_k'^2}{8} \quad (1.9)$$

$$a_{11x} = \frac{\theta_x D_k}{\lambda}, \quad a_{11y} = \frac{\theta_y D_k}{\lambda}$$

Деформация поверхности k -го элемента определяется последним членом выражения (1.7) и удобно описывается разложением функции волновой aberrации по системе ортогональных функций $P_j(\rho_k)$ степенями выше второй.

Положим, что элементы изготовлены идеально, т.е. ошибками формы поверхности элемента можно пренебречь. Кроме того, как видно из (1.9), коэффициент a_{20k} в $\frac{A'^2_k}{8} = \frac{A'^2}{8N^2}$ раз меньше a_{00k} и им также можно пренебречь. Действительно, например, при апертуре системы $A' = 0.125$ (1:4) и $N = 6$ $a_{20k} \ll 0.001a_{00}$. Тогда выражение (1.7) приводится к виду

$$W_k(\rho_k) = a_{00k} + \mathbf{a}_{11k}^T \boldsymbol{\rho}_k \quad (1.10)$$



Структура изображения $h(r)$ в синтезированной семиэлементной апертуре. Цифрами обозначены уровни $h(r)$; интервал $\Delta \lg h(r)$ между уровнями равен -0,301; 0-й уровень $-\Delta \lg h(r) = -2,709$, 1-й уровень $-\Delta \lg h(r) = -2,408$ и т. д., 9-й уровень $\Delta \lg h(r) = 0$

После подстановки (1.10) в (1.6), (1.5) получим

$$f_k(\mathbf{p}_k) = \Omega_k \exp[2\pi i(a_{00} + \mathbf{a}_{11k}^T \mathbf{p}_k)] \quad (1.11)$$

$$h(\mathbf{r}) = C \left| \sum_{k=1}^N \rho_{0k}^2 \exp[2\pi i(a_{00k} + \mathbf{r}^T \mathbf{p}_{ck})] \int_{\Omega_k} \exp[2\pi i \mathbf{a}_{11k}^T \mathbf{p}_k] \exp[2\pi i \mathbf{p}^T \mathbf{r}] d\Omega_k \right|^2 \quad (1.12)$$

Формула (1.12) пригодна для численного определения структуры изображения синтезированной апертуры при различных наклонах и смещениях элементов.

На рисунке приведена в логарифмическом масштабе топография функции рассеяния точки, вычисленной по формуле (1.12) при наличии следующих ошибок установки: $a_{001} = 0,25\lambda$; $a_{11x1} = 0,23\lambda$; $a_{11y1} = 0,3\lambda$.

2. Влияние погрешностей установки элементов на качество изображения

Обычно применяемый допуск по Рэлею, равный $\lambda/4$, не применим к данному случаю ввиду разрывного характера функции $W(\rho)$. Наиболее приемлемым критерием качества изображения можно считать критерий Марешаля [6], так как при его выводе в отличие от критерия Рэлея не накладывається никаких ограничений по характеру $W(\rho)$, кроме ее малости. По Марешалю число Штреля S , определяемое как отношение интенсивностей максимума пятна рассеяния при наличии aberrаций к наибольшей интенсивности при их отсутствии, связано со среднеквадратической волновой aberrацией $W_{СКВ}$ выражением

$$S \approx 1 - (2\pi W_{СКВ})^2 \quad (2.1)$$

Оптическая система считается достаточно совершенной, если $S \geq 0.8$. Из формулы (1.13) этому условию соответствует

$$W_{СКВ} \leq 1/14 \quad (2.2)$$

Отметим, что при оценке $W_{СКВ}$ в обычных оптических системах вводят оптимальную продольную и поперечную расфокусировку, т. е. оценивают $W_{СКВ}$ для точки наилучшей установки. В системах с синтезированной апертурой мы полагаем, что точка наилучшей установки совпадает с центром плоскости изображения, и мы не будем допускать смещения точки относительно параксиального изображения.

Определим $W_{СКВ}$ при смещениях и наклонах элементов. По определению

$$W_{СКВ} = [\overline{W}^2 - (\overline{W})^2]^{1/2} \quad (2.3)$$

В соответствии с выражениями (1.10) и (2.3) имеем

$$\begin{aligned}\bar{W} &= \frac{1}{N} \sum_{k=2}^N \frac{1}{\Omega_k} \int \int_{\Omega_K} (a_{00k} + a_{11k}^T \rho_k) d\Omega_k, \\ \bar{W}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{k=2}^N \frac{1}{\Omega_k} \int \int_{\Omega_K} (a_{00k} + a_{11k}^T \rho_k) d\Omega_k\end{aligned}\quad (2.4)$$

Выполняя интегрирование и полагая для простоты, что все элементы одинаковые и имеют форму кругов, находим

$$\begin{aligned}\bar{W} &= \frac{1}{N} \sum_{k=2}^N a_{00k} = \bar{a}_{00} \\ \bar{W}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{k=2}^N \left(a_{00k}^2 + \frac{1}{4} \|a_{11k}\|^2 \right) = \bar{a}_{00}^2 + \frac{1}{4} \bar{a}_{11}^2\end{aligned}$$

где $\|a_{11k}\|^2 = a_{11x}^2 + a_{11y}^2$. Тогда

$$W_{CKB} = \left[\bar{a}_{00}^2 - (\bar{a}_{00})^2 - \frac{1}{4} \bar{a}_{11}^2 \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

Для доказательства применимости критерия Марешаля (формулы (2.1), (2.5)) найдем точное выражение для числа Штреля S в случае наличия только смещений a_{00k} .

Из выражения (1.12) в этом случае получаем

$$\begin{aligned}h(\mathbf{r}) &= \left[\frac{2I_1(2\pi\mathbf{r})}{2\pi\mathbf{r}} \right]^2 \frac{1}{N^2} \sum_k^N \sum_l^N \exp[2\pi i(a_{00k} - a_{00l}) + \mathbf{r}^T(\rho_{ck} - \rho_{cl})] = \left[\frac{2I_1(2\pi\mathbf{r})}{2\pi\mathbf{r}} \right]^2 \times \\ &\times \frac{1}{N^2} \sum_k^N \sum_l^N \left[N + 2 \sum_{k=l}^N \sum_{l=k+1}^N \cos[2\pi(a_{00k} - a_{00l}) + \mathbf{r}^T(\rho_{ck} - \rho_{cl})] \right]\end{aligned}\quad (2.6)$$

Из этой формулы для числа Штреля S находим

$$S = h(0) = \frac{1}{N^2} \left[N + 2 \sum_{k=1}^N \sum_{l=k+1}^N \cos[2\pi(a_{00k} - a_{00k})] \right] \quad (2.7)$$

Положим, что смещается только один элемент, например первый, т.е. $a_{001} = a_{00}$; $a_{00k} = 0$, $k = 2, \dots, N$. Тогда

$$\begin{aligned}S &= \frac{1}{N^2} \left[N + 2 \sum_{l=2}^N \cos(2\pi a_{00}) + 2 \sum_{k=2}^N \sum_{l=k+2}^N 1 \right] = 1 - \frac{4(N-1)}{N^2} \sin^2 \pi a \\ S &\approx 1 - \left(2\pi \frac{\sqrt{N-1}}{N} a_{00} \right)^2\end{aligned}\quad (2.8)$$

Из формулы (2.5) для этого случая

$$\bar{a} = a_{00} / N, \quad \bar{a}^2 = a_{00}^2 / N$$

Тогда

$$W_{CKB} = \left[\frac{a_{00}^2}{N} - \left(\frac{a_{00}}{N} \right)^2 \right]^{1/2} = a_{00} \frac{\sqrt{N-1}}{N} \quad (2.9)$$

Из сравнения формулы (2.8) и (2.9) видно, что значения W_{CKB} , рассчитанные по точной и приближенной формулам, совпадают.

Таким образом, (2.2), (2.5) – основные формулы оценки качества изображения при наличии погрешностей установки элементов синтезированной системы.

3. Расчет допусков на установки элементов синтезированной системы

Для решения вопроса о допустимых величинах смещений и наклонов элементов воспользуемся аппаратом математической статистики. Пусть технологические погрешности распределены по нормальному закону, и при этом дисперсии всех смещений одинаковы и равны σ_a^2 , всех наклонов – σ_t^2 . Примем допуск на смещение равный $\pm\sigma_a$, а на наклоны $\pm 2\sigma_t$.

Найдем математическое ожидание (МО) числа Штреля. Для смещений (при отсутствии наклонов) можно воспользоваться точной формулой (2.7):

$$MO(S) = \frac{1}{N^2} \left[N + 2 \sum_{k=1}^N \sum_{l=k+1}^N MO[\cos 2\pi(a_{00k} - a_{00l})] \right] \quad (3.1)$$

Так как a_{00k}, a_{00l} статистически не зависимы, распределены по нормальному закону с дисперсией σ_a^2 и нулевым математическим ожиданием, то случайная величина $x = a_{00k} - a_{00l}$ будет распределена по нормальному закону с дисперсией $2\sigma_a^2$. Тогда

$$MO[\cos 2\pi x] = \int_{-\infty}^{+\infty} \cos 2\pi x \frac{1}{\sqrt{4\pi\sigma_{a_{00}}^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\sigma_{a_{00}}^2}\right) dx = \exp[-4\pi^2\sigma_{a_{00}}^2]$$

После подстановки полученного выражения в формулу (3.1) находим

$$MO(S) = \frac{1}{N^2} \left[N + \exp(-4\pi^2\sigma_{a_{00}}^2) 2 \sum_{k=1}^N \sum_{l=k+1}^N 1 \right] = \frac{N-1}{N} \exp(-4\pi^2\sigma_{a_{00}}^2) + \frac{1}{N} \quad (3.2)$$

В случае смещений и наклонов следует воспользоваться приближенными формулами (2.5) и (2.1):

$$MO(S) = 1 - 4\pi^2 \left[MO(\bar{a}_{00}^2) - MO(\bar{a}_{00})^2 + \frac{1}{4} MO(\bar{a}_{11}^2) \right] \quad (3.3)$$

где

$$MO(\bar{a}_{00}^2) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N MO(a_{00k}^2) = \sigma_a^2$$

$$MO(\bar{a}_{00}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N MO(a_{00k}) = 0$$

$$MO(\bar{a}_{11}^2) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [MO(a_{11x}^2) + MO(a_{11y}^2)] = 2\sigma_t^2$$

Таким образом,

$$MO(S) = 1 - 4\pi^2 \left[\sigma_{a_{00}}^2 + \frac{1}{2} \sigma_{a_{11}}^2 \right] \quad (3.4)$$

Сравнивая формулу (3.4) с (3.2), можно заключить, что при малых $\sigma_{a_{00}}$, $\sigma_{a_{11}}$ и больших N формула (3.2) переходит в формулу (3.4). Поэтому можно ожидать, что при любых N , $\sigma_{a_{00}}$, $\sigma_{a_{11}}$ будет справедливо

$$MO(S) = \frac{N-1}{N} \exp \left[-4\pi^2 \left(\sigma_{a_{00}}^2 + \frac{1}{2} \sigma_{a_{11}}^2 \right) \right] + \frac{1}{N} \quad (3.5)$$

Формула (3.5) позволяет определить допуски на величины смещений и наклонов элементов.

Преобразуем формулу (3.5), разложив в ряд ехр и ограничившись двумя членами разложения. Тогда

$$MO(S) = 1 - \frac{N-1}{N} 4\pi^2 \left(\sigma_{a_{00}}^2 + \frac{1}{2} \sigma_{a_{11}}^2 \right) \quad (3.6)$$

Обозначим через σ^2 общий допуск:

$$\sigma^2 = \sigma_{a_{00}}^2 + \frac{1}{2} \sigma_{a_{11}}^2$$

который распределим так:

$$\sigma_{a_{00}}^2 = \frac{1}{2} \sigma^2, \quad \sigma_{a_{11}}^2 = \sigma^2$$

Положим $MO(S) = 0,8$. Тогда формула (3.6) приводится к виду

$$\sigma^2 = \frac{1}{200} \frac{N}{N-1}, \quad \sigma = \frac{1}{14} \sqrt{\frac{N}{N-1}} \quad (3.7)$$

Из формулы (3.7) определим допуски на смещения δa и наклоны δt элементов:

$$\begin{aligned} \sigma_{a_{00}} &= \frac{1}{20} \sqrt{\frac{N}{N-1}}, \quad \sigma_{a_{11}} = \frac{1}{14} \sqrt{\frac{N}{N-1}} \\ \delta a &= 2\sigma_{a_{00}} = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{N}{N-1}}, \quad \delta t = 2\sigma_{a_{11}} = \frac{1}{7} \sqrt{\frac{N}{N-1}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Видно, что допуск на наклон в волновой мере в $\sqrt{2}$ раз свободнее, чем допуск на смещение.

В линейной и угловой мере из формулы (1.9) и (3.8) находим

$$\Delta l_k = \frac{\lambda \delta a}{2} = \frac{\lambda}{20} \sqrt{\frac{N}{N-1}}, \quad \theta_x = \theta_y = \frac{2\delta t \lambda}{D_k} = \frac{2\lambda}{10D_k} \sqrt{\frac{N}{N-1}} \quad (3.9)$$

Для многоэлементных систем $N > 5$

$$\Delta l_k = \frac{\lambda}{20}, \theta_x = \theta_y = \frac{\lambda}{5D_k}, \theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} = \frac{\lambda}{3,5D_k}$$

Например, для 6 - элементного главного зеркала зеркально-линзовой системы с диаметром элемента, равного 1000 мм, допустимые величины смещений и наклонов соответственно составляют при $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-3}$ мм $\Delta l_k = 0,03$ мкм, $\theta \approx 0,03''$. Видно, что требования к установке элементов для получения высококачественной оптической системы весьма высокие.

4. Погрешности изготовления элементов синтезированной апертуры

Положим теперь, что каждый элемент имеет погрешности изготовления, т.е. в выражении (1.7) присутствуют члены высоких порядков разложения aberrаций:

$$\sum_{j=3}^{\infty} q_{kj} P_j(\rho_k)$$

В соответствии с изложенным выше условием для оценки допустимых погрешностей является неравенство (2.2)

$$W_{СКВ} = [\overline{W}^2 - (\overline{W})^2]^{1/2} < \frac{1}{14}$$

где

$$\overline{W} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\Omega_k} \int \int_{\Omega_k} W_k(\rho_k) d\Omega_k$$

$$\overline{W}^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\Omega_k} \int \int_{\Omega_k} W_k^2(\rho_k) d\Omega_k$$

В силу ортогональности базиса разложения волновых aberrаций при одинаковых Ω_k имеем

$$\overline{W} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{00k} = \overline{a}_{00}$$

$$\overline{W}^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N \left(a_{00k}^2 + \frac{1}{4} a_{11k}^2 + \frac{1}{3} a_{20k}^2 + \sum_{j=3}^N q_{kj}^2 q_{\Omega k} \right)$$

Тогда

$$W_{СКВ} = \left[\overline{a}_{00}^2 - (\overline{a}_{00})^2 + \frac{1}{4} \overline{a}_{11}^2 + \frac{1}{3} \overline{a}_{20}^2 + \sum_{j=3}^N \overline{q}_j^2 q_{\Omega k} \right] \quad (4.1)$$

где \overline{q}_j^2 – средний квадрат коэффициента, описывающего деформацию j -й степени; $q_{\Omega k}$ – норма полинома. Из выражения (4.1) видно, что ошибки изготовления элементов синтезированной апертуры влияют в среднем на качество изображения в общей апертуре точно так же, как и при

самостоятельной работе элемента как независимой системы. Таким образом, допуски на ошибки изготовления каждого элемента должны быть того же порядка, что и при целой апертуре, т. е. порядка $\lambda/14$ в среднеквадратическом смысле.

ВЫВОДЫ

1. Получено аналитическое выражение (1.12) для расчета структуры оптического изображения – функции рассеяния точки синтезированной системы при наличии погрешностей установки элементов.

2. Показано, что средний квадрат деформации волнового фронта $W_{СКВ}$ определяется выражением (2.5), а формулы (3.2), (3.6), (3.8) определяют допуски на смещения и наклоны элементов.

3. Показано, что для многоэлементной синтезированной апертуры $N > 5$ в волновой мере допустимые смещения составляют $\lambda/10$, $\lambda/7$ и наклоны практически не зависят от числа элементов N . Допустимые линейные смещения элемента составляют $\lambda/20$, а его угловые наклоны $\lambda/5D_k$; с увеличением числа элементов D_k уменьшаются, а допустимые угловые наклоны элементов увеличиваются.

4. Продольные смещения, различающиеся на целые числа длин волн, эквивалентны по a_{00k} , но не эквивалентны по дефокусировке a_{20k} . Из критерия Марешаля $\frac{1}{4}a_{20k}^2 < \frac{1}{14}$, $a_{20k} < 0,53$. Из условия допустимой расфокусировки $(\Delta l_{кр}) \Delta l_{кр} < 0,53 \frac{4\lambda}{A_k^2}$, тогда как из условия фазировки $\Delta l_{кр} < \lambda/20$.

Следовательно, требуется сначала грубо отъюстировать продольные смещения с точностью $\Delta l_{кр}$, а затем точно отслеживать с точностью Δl_k .

ЛИТЕРАТУРА

1. Синцов В. Н., Запрягаев А. Ф. *Успехи физ. Наук.* 1974. 114. 655 .
2. Рябова Н. В. *Оптико-механич. промышл.* 1975. № 11. 58 .
3. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Я. *Оптика и спектроскопия.* 1974. 36. 792.
4. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н., Лапо Л. М. *Оптико-механич. промышл.* 1976. № 11. 5.
5. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики.* –М. «Наука». 1970.
6. Марешаль А., Франсон М. *Структура оптического изображения.* – М. «Мир». 1964.