

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317.1

АНАЛИЗ СХЕМЫ КОНТРОЛЯ ВОГНУТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

© 2005 г. В. А. Зверев, доктор техн. наук; Е. В. Кривоустова

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

Проведен абберационный анализ однолинзовой компенсационной схемы контроля вогнутых несферических поверхностей вращения с промежуточным и без промежуточного изображения точечного источника излучения. Получены соотношения, определяющие функциональные возможности дополнительной линзы в схеме Оффнера, расположенной вблизи центра кривизны в осевой точке контролируемой поверхности.

Коды OCIS: 220.0220.

Поступила в редакцию 02.03.2005.

Компенсационный метод контроля вогнутых отражающих поверхностей вращения несферической формы основан на применении линзового, зеркального или зеркально-линзового компонента, преобразующего сферический волновой фронт, излучаемый точечным источником, в волновой фронт, эквидистантный контролируемой поверхности и в конечном счете совпадающий с ней [1–4]. Погрешность формы главных зеркал оптических систем космического базирования, формирующих изображение, качество которого ограничено дифракцией, не должна превышать $\lambda/20$ в видимом диапазоне спектра излучения, а поэтому желательно, чтобы оптические элементы компенсаторов для их аттестации были ограничены плоскими или сфериче-

скими поверхностями, которые можно обработать с необходимой точностью.

В общем случае компенсационную схему контроля формы несферической поверхности можно представить в виде, показанном на рис. 1. Здесь φ_k – компенсатор, φ_0 – контролируемая поверхность, S – точечный источник излучения. Для исключения путаницы в знаках величин после контролируемой поверхности формально введена плоская отражающая поверхность, образующая с контролируемой поверхностью “зеркальную линзу” с показателем преломления среды между ними $n_0 = -1$. В соответствии с рисунком имеем

$$\tilde{a}_k = -a'_k, \tilde{a}'_k = -a_k, a'_0 = -a_0 = -r_0.$$

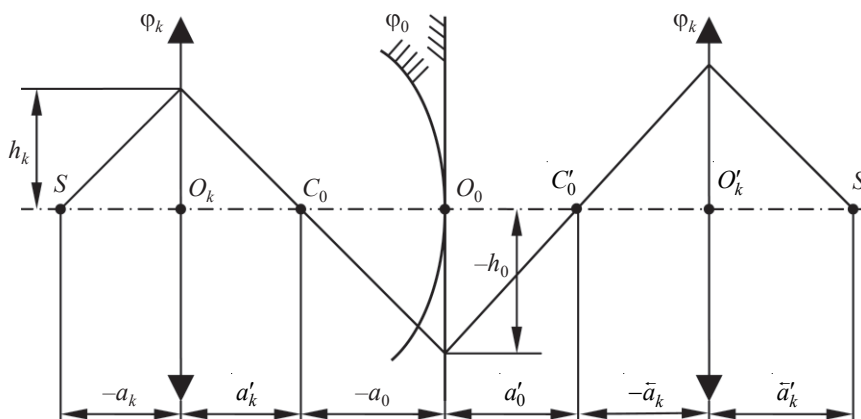


Рис. 1. Компенсационная схема контроля несферической поверхности.

В рассматриваемом случае с точностью до малой величины углового поля $\omega = y/b$, где b – расстояние от осевой точки предмета (источника излучения S) до осевой точки входного зрачка, первичные aberrации (aberrации третьего порядка) в изображении точки, образованном компонентом, равны

$$-2\delta g' = \omega'(\omega'^2 + \Omega'^2)S_I + (3\omega'^2 + \Omega'^2)\frac{y}{b}S_{II}, \quad (1)$$

$$-2\delta G' = \Omega'(\omega'^2 + \Omega'^2)S_I + 2\omega'\Omega'\frac{y}{b}S_{II}. \quad (2)$$

Здесь

$$S_I = B_0 = \sum_{i=1}^{i=n} h_i Q_i, \quad (3)$$

$$S_{II} = J(K_0 + qB_0), \quad (4)$$

где J – инвариант Лагранжа–Гельмгольца,

$$q = \frac{1}{J} \frac{H_1}{h_1} = \frac{v_1}{h_1^2 \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_{p1}} \right)} = \frac{1}{h_k^2 \left(\frac{1}{a_k} - \frac{1}{a_{pk}} \right)}, \quad v = \frac{1}{n},$$

a_{pk} – расстояние от первой поверхности компенсатора до осевой точки входного зрачка;

$$K_0 = -\sum_{i=1}^{i=n} W_i + \sum_{i=1}^{i=n} h_i S_i Q_i,$$

$$W_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} (v_{i+1}\alpha_{i+1} - v_i\alpha_i), \quad v_i = \frac{1}{n_i};$$

$$S_i = \sum_{k=2}^{k=i} \frac{d_{k-1}}{h_{k-1}h_k n_k}, \quad Q_i = T_i \sigma_i + P_i, \quad P_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} W_i,$$

$$T_i = \frac{(n_{i+1}\alpha_{i+1} - n_i\alpha_i)^3}{(n_{i+1} - n_i)^2},$$

σ_i – коэффициент деформации сферической поверхности в уравнении $x^2 + y^2 = 2rz - (1 + \sigma)z^2$.

Проблемы изготовления и аттестации компенсатора определяют требование предельной простоты его конструкции. В простейшем случае компенсатор представляет собой отдельную линзу в воздухе. Будем считать эту линзу тонкой. Тогда оптическую систему в соответствии со схемой на рис. 1 можно записать в виде

$\alpha_1 = -1$		$n_1 = 1$
$\alpha_2 = \alpha_k$	$d_1 = 0$	$n_2 = n_i$
$\alpha_3 = \alpha_0$	$d_2 = a'_k - r_0$	$n_3 = 1$
$\alpha_4 = \alpha_0$	$d_3 = 0$	$n_4 = -$
$\alpha_5 = -\alpha_0$	$d_4 = a'_k - r_0$	$n_5 = 1$
$\alpha_6 = -\alpha_k$	$d_5 = 0$	$n_6 = n_i$
$\alpha_7 = \alpha' = 1$		$n_7 = 1.$

При этом $h_1 = h_2 = h_5 = h_6 = h_k = a_k\alpha_1 = -a_k$, $h_3 = h_4 = h_0 = \alpha_0 r_0$,

$$W_1 = -W_6 = -\frac{1 + \alpha_k}{1 - v_k} (1 + v_k \alpha_k),$$

$$W_2 = -W_5 = \frac{\alpha_0 - \alpha_k}{1 - v_k} (\alpha_0 - v_k \alpha_k),$$

$$W_3 = W_4 = 0;$$

$$P_1 = P_6 = \left(\frac{1 + \alpha_k}{1 - v_k} \right)^2 (1 + v_k \alpha_k),$$

$$P_2 = P_5 = \left(\frac{\alpha_0 - \alpha_k}{1 - v_k} \right)^2 (\alpha_0 - v_k \alpha_k),$$

$$P_3 = P_4 = 0, \quad S_1 = S_2 = 0,$$

$$S_3 = S_2 + \frac{d_2}{h_2 h_3 n_3} = 0 + \frac{a'_k - r_0}{h_k h_0} = \frac{a_k + r_0 \alpha_0}{a_k r_0 \alpha_0^2},$$

$$S_4 = S_3 + \frac{d_3}{h_3 h_4 n_4} = S_3,$$

$$S_5 = S_4 + \frac{d_4}{h_4 h_5 n_5} = S_3 + \frac{a'_k - r_0}{h_0 h_k} = 2S_3,$$

$$S_6 = S_5 + \frac{d_5}{h_5 h_6 n_6} = S_5 = 2S_3.$$

В рассматриваемом случае коэффициенты деформации $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$, $\sigma_3 \neq 0$. При этом $Q_1 = P_1 = P_6 = Q_6$, $Q_2 = P_2 = P_5 = Q_5$, $Q_3 = T_3 \sigma_3$, $Q_4 = 0$. Параметр $T_3 = -2\alpha_0^3$. Обозначив $\sigma_3 = \sigma_0$, имеем $Q_3 = -2\sigma_0 \alpha_0^3$.

Итак,

$$S_I = B_0 = 2h_k (P_1 + P_2) + h_0 Q_3, \quad (5)$$

$$S_{II} = J(K_0 + qB_0). \quad (6)$$

Легко убедиться, что $\sum_{i=1}^{i=6} W_i = 0$. При этом

$$K_0 = h_3 S_3 Q_3 + h_5 S_5 P_5 + h_6 S_6 P_6 = S_3 [2h_k (P_1 + P_2) + h_0 Q_3] = S_3 B_0.$$

Следовательно,

$$S_{II} = JB_0 (S_3 + q), \quad (7)$$

где коэффициент

$$q = \frac{a_k a_{pk}}{h_k^2 (a_{pk} - a_k)}.$$

По смыслу решаемой задачи апертурной диафрагмой в рассматриваемой схеме является наружный контур контролируемой поверхности. Тогда

$$a'_{pk} = a'_k - r_0 = -\frac{a_k + r_0 \alpha_0}{\alpha_0}.$$

Используя формулу отрезков, находим, что

$$a_{pk} = \frac{a'_{pk}}{1 - \varphi_k a'_{pk}} = \frac{a'_{pk}}{1 - \frac{1 + \alpha_0}{h_k} a'_{pk}} = a_k \frac{a_k + r_0 \alpha_0}{a_k + (1 + \alpha_0) \alpha_0 r_0}.$$

При этом

$$q = \frac{a_{pk}}{a_k (a_{pk} - a_k)} = -\frac{a_k + r_0 \alpha_0}{a_k r_0 \alpha_0^2}.$$

Следовательно,

$$S_{II} = JB_0 \left(\frac{a_k + r_0 \alpha_0}{a_k r_0 \alpha_0^2} - \frac{a_k + r_0 \alpha_0}{a_k r_0 \alpha_0^2} \right) = 0.$$

Полученные соотношения позволяют преобразовать выражение, определяющее коэффициент S_1 первичной абберации, к виду:

$$S_1 = 2 \frac{n_k h_k}{(n_k - 1)^2} \left[(2 + n_k)(1 + \alpha_0) \alpha_k^2 + (1 + 2n_k)(1 - \alpha_0^2) \alpha_k + n_k (1 + \alpha_0^3) - \frac{(n_k - 1)^2}{n_k} \frac{h_0}{h_k} \sigma_0 \alpha_0^3 \right]. \quad (8)$$

Смысл применения компенсатора состоит в том, чтобы суммарная абберация в изображении точки S в точке S' была бы равна нулю, а следовательно, что-

бы был равен нулю коэффициент S_1 . Заметим, что при $\alpha_0 = -1$ коэффициент $S_1 = 2h_0 \sigma_0$. При этом $S_1 = 0$ при $\sigma_0 = 0$.

При $\alpha_0 = 1$ условие $S_1 = 0$ выполняется при вещественном решении уравнения

$$\alpha_k = \sqrt{\frac{n_k}{2 + n_k} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{n_k - 1}{n_k} \right)^2 \frac{h_0}{h_k} \sigma_0 - 1 \right]}. \quad (9)$$

Отсюда следует, что при $\alpha_0 = 1$ угол $\alpha_k = 0$, если

$$\frac{h_0}{h_k} \sigma_0 = 2 \left(\frac{n_k}{n_k - 1} \right)^2.$$

Легко убедиться, что при $n_k = 1,5-1,8$ соотношение $\frac{h_0}{h_k} \sigma_0 = 18-10$.

В общем случае выполнение условия $S_1 = 0$ определяется уравнением

$$\alpha_k^2 + \frac{1 + 2n_k}{2 + n_k} (1 - \alpha_0) \alpha_k + \frac{n_k}{2 + n_k} \frac{1 + \alpha_0^3}{1 + \alpha_0} \times \left[1 - \left(\frac{n_k - 1}{n_k} \right)^2 \frac{h_0}{h_k} \frac{\alpha_0^3}{1 + \alpha_0^3} \sigma_0 \right] = 0. \quad (10)$$

Решение этого уравнения можно представить в виде

$$\alpha_k = -\frac{1 + 2n_k}{2 + n_k} \frac{1 - \alpha_0}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{1 + 2n_k}{2 + n_k} \right)^2 \frac{(1 - \alpha_0)^2}{4} - \frac{n_k}{2 + n_k} \frac{1 + \alpha_0^3}{1 + \alpha_0} \left[1 - \left(\frac{n_k - 1}{n_k} \right)^2 \frac{h_0}{h_k} \frac{\alpha_0^3}{1 + \alpha_0^3} \sigma_0 \right]}. \quad (11)$$

Полученное выражение определяет функциональную зависимость угла α_k от конструктивных параметров оптической системы контроля формы несферической поверхности: показателя преломления n_k материала линзы компенсатора, угла α_0 , отношения высот $m = h_0/h_k$ и коэффициента деформации сферической поверхности σ_0 . По сути дела выражение (11) определяет семейство возможных вариантов однолинзовых компенсаторов.

Важно обратить внимание на то, что в уравнении поверхности второго порядка (за исключением сплюсненного эллипсоида) величина коэффициента $\sigma_0 < 0$. Кроме того, вполне очевидно, что при $h_0/h_k > 0$ угол $\alpha_0 < 0$, а при $h_0/h_k < 0$ угол $\alpha_0 > 0$. Таким образом, под корнем выражения (11) имеем

$$\left(\frac{1 + 2n_k}{2 + n_k} \right)^2 \frac{(1 - \alpha_0)^2}{4} > 0, \quad \frac{n_k}{2 + n_k} \frac{1 + \alpha_0^3}{1 + \alpha_0} > 0, \\ \left(\frac{n_k - 1}{n_k} \right)^2 \frac{h_0}{h_k} \frac{\alpha_0^3}{1 + \alpha_0^3} \sigma_0 > 0.$$

Чтобы иметь представление о возможных числовых значениях углов α_0 и α_k , рассмотрим случай контроля поверхности отражающего парабооида, т. е. случай, когда $\sigma_0 = -1$. Вполне очевидно, что уравнение (10) имеет вещественные корни, если подкоренное выражение в решении (11) уравнения (10) больше нуля или равно нулю. Рассмотрим предельный случай, когда подкоренное выражение равно нулю. При этом относительно угла α_0 получаем уравнение третьей степени вида

$$a \alpha_0^3 + b \alpha_0^2 + c \alpha_0 + d = 0, \quad (12)$$

$$\text{где } a = \frac{A}{1 + 2n_k} \left(\frac{4n_k - 1}{A} + m \right), \quad b = c = 1, \quad d = \frac{4n_k - 1}{(1 + 2n_k)^2}, \\ A = 4(n_k - 1)^2 \frac{2 + n_k}{n_k}, \quad m = h_0 / h_k.$$

Как следует из выражения (11), угол α_k в этом случае определяется формулой

$$\alpha_k = -\frac{1 + 2n_k}{2 + n_k} \frac{1 - \alpha_0}{2}. \quad (13)$$

Пусть показатель преломления материала компенсатора $n_k = 1,5$. Предельное положительное значение отношения высот $m = 1$. При этих значениях n_k и m уравнение (12) принимает вид

$$0,458333\alpha_0^3 + \alpha_0^2 + \alpha_0 + 0,3125 = 0.$$

Решение этого уравнения дает значение угла $\alpha_0 = -0,5154$. Подставив его в формулу (13), получаем $\alpha_k = -0,8659$. При $m = 10$ аналогично находим, что $\alpha_0 = -0,3595$, $\alpha_k = -0,7768$.

Из выражения, определяющего коэффициент a в уравнении (12), следует, что при $m = -\frac{4n_k - 1}{A}$ коэффициент $a = 0$. При этом уравнение (12) вырождается в квадратное уравнение, которое не имеет вещественных корней. Следовательно, при отрицательных значениях отношения высот величина m должна удовлетворять условию

$$m < -\frac{4n_k - 1}{A} = -\frac{1}{4} \frac{n_k}{2 + n_k} \frac{4n_k - 1}{(n_k - 1)^2}.$$

При $n_k = 1,5$ это условие принимает вид $m < -2,1429$.

Пусть $m = -5$. При этом находим, что $\alpha_0 = 3,2182$, а $\alpha_k = -1,2675$. Однако в этом случае если угловой размер контролируемой из центра кривизны поверхности равен 2ω , то угловая величина наблюдаемого из точки S' изображения этой поверхности равна

$$2\omega' = \left| \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \right| 2\omega = \frac{2\omega}{3,2182}.$$

Таким образом, при $2\omega \approx 1:8$ угловая величина изображения $2\omega' \approx 1:26$, а это означает, что на расстоянии, равном, например, 250 мм, будем наблюдать изображение контролируемой поверхности диаметром примерно 10 мм. Это изображение можно увеличить, если совместить изображение S' точечного источника излучения с осевой точкой поверхности изображения, образованного микрообъективом, а наблюдать полученное изображение из осевой точки плоскости предмета микрообъектива, т. е. применить микрообъектив в обратном ходе лучей. В рассматриваемом случае можно применить, например, ахроматический микрообъектив 6,3×0,17 (ОХ-27), имеющий рабочее расстояние около 10 мм. Величина наблюдаемого при этом изображения будет равна примерно 60 мм.

Положив $m = -10$, получаем $\alpha_0 = 1,5495$, а $\alpha_k = 0,628$. Заметим, что увеличение показателя преломления материала компенсатора приводит к более благоприятным параметрам. Так, например, при $n_k = 1,75$ и $m = -10$ получаем $\alpha_0 = 1,0746$, $\alpha_k = 0,0448$.

Из габаритных соотношений и из соотношений возможности изготовления компенсатора абсолют-

ная величина отношения высот m достаточно велика. При этом достаточно велики и апертурные углы в пространстве предметов и изображений компенсатора, что приводит к появлению aberrаций более высокого порядка. Поэтому далеко не всегда с помощью отдельной линзы в воздухе, преломляющие поверхности которой имеют сферическую форму, можно построить безабберационную оптическую систему контроля требуемой несферической поверхности. Это приводит к необходимости усложнения конструкции компенсатора. И в этом случае в первом приближении задача расчета параметров компенсатора сводится к устранению первичной aberrации в схеме контроля, определяемой коэффициентом, равным

$$S_1 = S_{1k} + h_0 Q_0 = S_{1k} - 2h_0 \sigma_0 \alpha_0^3,$$

где S_{1k} – коэффициент первичной aberrации, вносимой оптической системой компенсатора в изображение точки, причем $S_{1k} = \sum_{i=1}^{i=s} Q_i$.

При $S_1 = 0$ получаем $S_{1k} = 2h_0 \sigma_0 \alpha_0^3$. При достаточно “тонкой” оптической системе компенсатора последнее выражение можно представить в виде

$$Q_k = 2 \frac{h_0}{h_k} \sigma_0 \alpha_0^3,$$

где $Q_k = \sum_{i=1}^{i=s} (T_i \sigma_i + P_i)$. При этом “лишние” параметры можно использовать для лучшей компенсации остаточной aberrации различных порядков.

Идея контроля параболических зеркал компенсационным методом впервые была высказана в 1921 году и практически осуществлена В.П. Линником [1]. В 1924 году Д.Д. Максудов предложил использовать компенсационный метод для контроля параболоидных зеркал с помощью значительно меньших по размеру сферических зеркал [2]. В дальнейшем идея контроля компенсационным методом была развита в работах Кудэ [5], Далла [6], Росса [7], Оффнера [8, 9] и др. Большой вклад в теорию и практику применения компенсационного метода внес Д.Т. Пуряев [3, 10]. Им разработан ряд оригинальных конструкций компенсаторов и компенсационных схем для контроля различных несферических поверхностей.

Оригинальную схему линзового компенсатора для контроля отклонений обрабатываемой поверхности отражающего параболоида от номинальной формы предложил в 1963 году А. Оффнер. Компенсационная схема контроля с компенсатором Оффнера показана на рис. 2. Здесь компенсатор Φ_k в виде плосковыпуклой линзы изображает точечный источник S в центр кривизны C_0 в осевой точке контролируемой поверхности Σ . Принципиальным от-

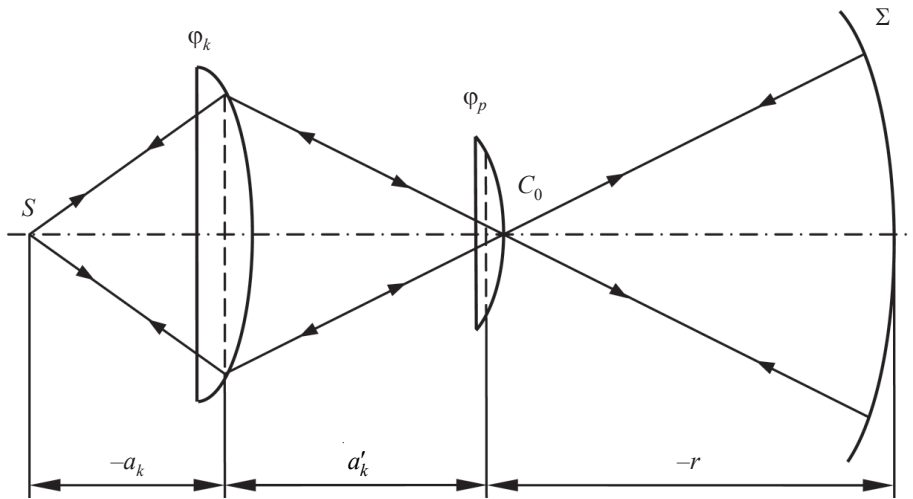


Рис. 2. Компенсатор Оффнера с полевой линзой φ_p .

личием компенсатора Оффнера от других компенсаторов является необходимость промежуточного изображения точечного источника между компенсатором φ_k и контролируемой поверхностью Σ , при этом компенсатор φ_k может быть линзовым, зеркально-линзовым или зеркальным.

При разработке линзового компенсатора Ф. Росс обнаружил, что чем дальше от центра кривизны отражающей поверхности параболоида он помещал линзу, тем меньше была остаточная aberrация при наличии точной компенсации в центре и на краю поверхности. Если бы компенсатор был помещен в непосредственной близости к параболоиду, то сферическая aberrация в изображении точки, образованном компенсатором, вполне соответствовала бы сферической aberrации нормалей к контролируемой поверхности. Однако при этом компенсатор пришлось бы делать таким же большим, как и контролируемая поверхность. А. Оффнер отмечал [11], что небольшая линза, образующая действительное изображение точечного источника в центре кривизны параболоида, в сочетании с полевой линзой, изображающей ее на поверхности параболоида, с оптической точки зрения эквивалентна большой линзе вблизи контролируемой поверхности. Однако вполне очевидно, что речь идет лишь о совмещении поверхности преобразованного компенсатором волнового фронта с контролируемой поверхностью. При этом при равенстве первичных aberrаций aberrации более высокого порядка в изображении, образованном линзой вблизи поверхности и рассматриваемой линзой, могут весьма заметно различаться. Таким образом, замена большой линзы вблизи поверхности малой линзой, как показано на рис. 2, определяется соображениями технологичности (меньшей трудоемкости) ее изготовления [12]. Как справедливо отмечал А. Оффнер, при наличии в его схеме полевой линзы нужно лишь, чтобы изображе-

ние точки, образованное линзой компенсатора φ_k , обладало первичной сферической aberrацией, достаточной для компенсации разброса точек пересечения с оптической осью нормалей к контролируемой несферической поверхности. Тогда изменением оптической силы полевой линзы φ_p и, соответственно, положения изображения линзы φ_k можно добиться сведения aberrаций высшего порядка к минимуму. Последнее замечание А. Оффнера следует рассмотреть более обстоятельно.

В общем случае сечение несферической поверхности вращения плоскостью yOz можно определить уравнением вида

$$y^2 = a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + \dots + a_n z^n, \quad (14)$$

где $a_1 = 2r$, r – радиус кривизны в вершине поверхности. Пусть NC_N – нормаль к поверхности в точке $N = N(y, z)$, пересекающая ось Oz в точке $C_N = C_N(O, z_N)$, как показано на рис. 3.

В соответствии с рисунком

$$z_N = z + \frac{y}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (15)$$

$$\text{Но } \operatorname{tg} \varphi = \frac{dz}{dy} = \frac{2y}{a_1 + 2a_2 z + \dots + na_n z^{n-1}}.$$

При этом

$$z_N = \frac{1}{2} a_1 + (1 + a_2) z + \frac{3}{2} a_3 z^2 + \dots + \frac{1}{2} na_n z^{n-1}. \quad (16)$$

В рассматриваемом случае сечение поверхности меридиональной плоскостью удобно представить степенным рядом в функции от ординаты y , т. е. определить уравнением вида

$$z = \frac{1}{r} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}} + a_1 y^2 + a_2 y^4 + \dots + a_n y^{2n}. \quad (17)$$

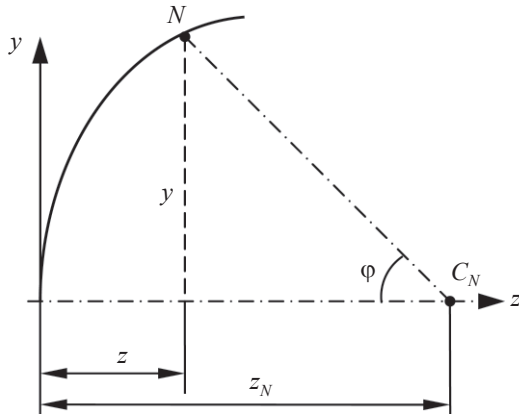


Рис. 3. Сечение несферической поверхности вращения меридиональной плоскостью.

Тогда

$$z_N = \frac{1}{r} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}} + a_1 y^2 + a_2 y^4 + \dots + a_n y^{2n} + \frac{r \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}}{1 + 2r \left(a_1 + 2a_2 y^2 + \dots + na_n y^{2(n-1)} \right) \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}}. \quad (18)$$

В случае несферической поверхности второго порядка, т. е. при $a_1 = a_2 = \dots = a_n = 0$, выражение (18) принимает вид

$$z_N = r + \frac{e^2}{r} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}}. \quad (19)$$

При $y = 0$ абсцисса $z_{ON} = r$. При этом разброс точек пересечения нормалей к поверхности с оптической осью (сферическая aberrация нормалей к поверхности) равен

$$\Delta z_N = z_N - z_{ON} = \frac{e^2}{r} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}}. \quad (20)$$

Предположим, что тонкий компонент ϕ_p расположен на расстоянии $z_p = r + \Delta$ от вершины несферической поверхности. При этом отклонение точек

пересечения с оптической осью нормалей к поверхности относительно компонента ϕ_p определится очевидным соотношением вида

$$\delta z_p = z_N - z_p = \frac{e^2}{r} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}} - \Delta. \quad (21)$$

В первом приближении будем считать, что тонкий компонент ϕ_p не вносит aberrаций в образованные им изображения точек. Тогда, полагая отрезок δz_p равным переднему отрезку a_p компонента ϕ_p , в соответствии с формулой отрезков получаем $a'_p = a_p / (1 + \phi_p a_p)$.

Подставив в это соотношение выражение (21) и преобразовав, получаем

$$a'_p = f'_p \frac{e^2 y^2 - r \Delta \left(1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2} \right)}{e^2 y^2 + f'_p r (1 - \phi_p \Delta) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2} \right)}. \quad (22)$$

Если $y = 0$, то $a'_{0p} = -f'_p \Delta / (f'_p - \Delta)$.

При этом положение изображений точек пересечения нормалей к поверхности с оптической осью, образованных компонентом ϕ_p , определится разностью отрезков a'_p и a'_{0p} в виде

$$\begin{aligned} \delta z'_N &= a'_p - a'_{0p} = \\ &= \frac{f_p'^2}{f_p' - \Delta} \frac{\frac{e^2}{r} y^2}{\frac{e^2}{r} y^2 + (f_p' - \Delta) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2} \right)}. \end{aligned} \quad (23)$$

Легко убедиться, что при $f_p' = \infty$ выражение (23) принимает вид выражения (20). Разделив числитель и знаменатель выражения (23) на $f_p'^2$ и преобразовав, получаем

$$\begin{aligned} \delta z'_N &= \frac{1}{(1 - \tilde{\Delta})^2} \frac{e^2}{r} \frac{y^2}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2} \right) \left(1 + \frac{1}{1 - \tilde{\Delta}} \frac{e^2}{r f_p'} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}} \right)} \\ \text{или} \\ \delta z'_N &\approx \frac{1}{(1 - \tilde{\Delta})^2} \frac{e^2}{r} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}} \left(1 - \frac{1}{1 - \tilde{\Delta}} \frac{e^2}{r f_p'} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Заметим, что при $\tilde{\Delta} = 0$ выражение (24) принимает вид

$$\delta z'_N \approx \frac{e^2}{r} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}} \times \left(1 - \frac{e^2}{rf'_p} \frac{y^2}{1 + \sqrt{1 + \frac{e^2 - 1}{r^2} y^2}} \right). \quad (25)$$

Анализ полученных соотношений, определяющих влияние полевой линзы φ_p на aberrации компенсатора в целом, позволяет сделать следующие выводы:

1. Полевая линза, расположенная в плоскости, проходящей через центр кривизны в осевой точке несферической поверхности, т. е. при $\Delta = 0$, влияет только на aberrации высшего порядка, причем влияние тем больше, чем больше ее оптическая сила.

2. Смещение полевой линзы из плоскости, проходящей через центр кривизны в осевой точке несферической поверхности, вдоль оптической оси на расстояние Δ влияет на aberrации как высшего, так и третьего порядка, причем влияет не само смещение, а отношение смещения полевой линзы к ее фокусному расстоянию.

Вполне естественно предположить, что при достаточно больших величинах разброса точек пересечения нормалей к поверхности с оптической осью на aberrации оказывает влияние и прогиб полевой линзы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Линник В.П. Способ исследования параболических зеркал и астрономических объективов // Труды Госу-

дарственного оптического института. Л.: Гостехиздат. 1931. Т. VII. В. 67. С. 15.

2. Максудов Д.Д. Анаберрационные отражающие поверхности и системы и новые способы их испытания // Труды Государственного оптического института. Л.-М.: Гостехиздат. 1932. Т. VIII. В. 86. 120 с.

3. Пурыев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 262 с.

4. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.

5. Couder A. Procédé d'Examen d'un Miroir Concave Non-spherique // Revue d'Optique therique et instrumentale. 1927. Ann. 6. № 2. P. 49–55.

6. Dall H.E. A Null Test for Paraboloids / In "Amateur Telescopes Making" (Book Three). New York: Scientific American, 1953. P. 149–153.

7. Ross F.E. Parabolizing mirrors without a flat // Astrophysical Journal. 1943. V. 98. № 6. P. 341–346.

8. Offner A. A Null Corrector for Paraboloidal Mirrors // Appl. Opt. 1963. V. 2. № 2. P. 153–155.

9. Offner A. Field Lenses and Secondary Axial Aberration // Appl. Opt. 1969. № 8. P. 1735–1736.

10. Креопалова Г.В., Пурыев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.

11. Оффнер А. Компенсационные методы контроля / В кн. "Оптический производственный контроль". Под ред. Д. Малакары. Перев. с англ. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.

12. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 296 с.