

за начальные значения ординат обычно принимаются ординаты точек пересечения лучей с плоскостью, касательной к вершине корректора. Как отмечается в [1], наблюдается достаточно быстрая сходимость процесса приближений.

Отметим следующие недостатки этого алгоритма и ему подобных. Во-первых, предполагается известным вид уравнения поверхности, т.е. задается определенное количество коэффициентов в уравнении планоида. А так как априори неизвестно, сколько коэффициентов необходимо для коррекции, то подбирать их количество нужно в интерактивном режиме. Во-вторых, как будет показано ниже, значения коэффициентов уравнения планоида высшего порядка достигают величины 10^{-99} и менее, что создает определенные трудности вычислительного характера. В-третьих, требуется достаточно большое количество итераций при неудачном начальном приближении точек встречи лучей с поверхностью планоида.

Предлагаемый способ основан на минимизации волновой аберрации, рассчитанной на поверхности корректора, каковым является планоид. В этом случае волновой фронт от точечного монохроматического источника можно представить как поверхность равного эйконала [3], а волновая аберрация находится как разность волновых фронтов от предмета и его безабберационного изображения на поверхности корректора.

Эйконал волны, создаваемой точечным монохроматическим источником в точке, есть

$$F = \sum_i L_i N_i, \quad (5)$$

где N_i – показатель преломления среды i , в которой волна проходит путь длиной L_i .

Таким образом, коррекционная поверхность для выполнения принципа Ферма должна преобразовать эйконал от источника в эйконал от изображения.

Используя стандартную программу расчета хода лучей через оптическую систему, находится эйконал от предмета $-F(x, y, z)$ и эйконал от изображения $-F_m(x, y, z)$, где x, y, z – это в общем случае криволинейные координаты точек на поверхности корректора. Эйконал F_0 , соответствующий компенсируемой волновой аберрации, может быть записан в виде

$$F_0 = F_m - F. \quad (6)$$

Фазовая модуляция, осуществляемая корректором при нормальном падении света, имеет вид

$$F(x, y, z) = d(N - 1), \quad (7)$$

где d – величина стрелки прогиба. Следовательно, для компенсации волновой аберрации необходимо изменить стрелку прогиба в данной точке на величину

$$d = F_0 / (N - 1). \quad (8)$$

В общем случае к поверхности добавляется оптическая длина пути d со знаком.

При больших значениях F_0 возникает необходимость итерационного процесса, что связано с погрешностью переноса точек поверхности.

По предложенной схеме был выполнен расчет светосильной системы Шмидта. В начале расчета система состояла из коррекционной пластинки толщиной 10 мм, помещенной в центр кривизны сферического зеркала с радиусом кривизны 4000 мм, входная апертура системы 1000 мм. Оптимизация проводилась для предмета, помещенного на бесконечности.

Рассчитанные значения эйконалов на поверхности корректора аппроксимировались кубическими сплайнами. В соответствии с описанной процедурой был выполнен расчет коррекционного планоида на заданной поверхности. После этого с помощью прямого расчета хода лучей была вычислена величина остаточной волновой аберрации.

Для коррекции расчет хода лучей потребовалось провести три раза. График остаточной волновой аберрации приведен на рис. 2, а, а вид профиля корректора на рис. 1 (кривая 1). Уравнение коррекционной поверхности имеет вид

$$z = -7,65 \cdot 10^{-21} y^4. \quad (9)$$

Волновая аберрация составила 0,09 мк на краю апертуры, и менее 0,002 мкм на апертуре меньше 400 мм. Расчетная длина волны $\lambda = 0,6328$ мкм. Погрешность определения профиля

поверхности составила 0,17 мкм или $\approx \lambda/4$ на краю апертуры и менее 0,004 мкм или $\approx \lambda/160$ на апертуре менее 400 мм.

Корректор с таким профилем поверхности не является оптимальным с точки зрения технологии его изготовления. В этом смысле интересен корректор, профиль коррекционной поверхности которого приведен на рис. 1, кривая 2, значение остаточной волновой aberrации приведено на рис. 2, б. Он был получен при смещении фокальной плоскости зеркала (расфокусировки) на $-7,5$ мм.

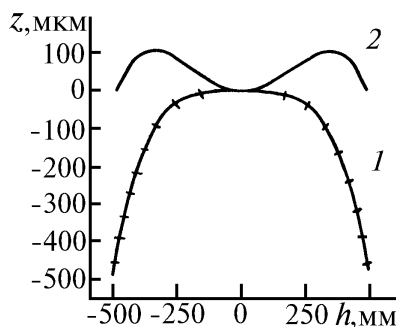


Рис. 1. Профиль коррекционного planoида системы Шмидта: 1 – профиль корректора, расположенного в центре сферического зеркала; 2 – профиль корректора, смещенного на расстояние 7,5 мм

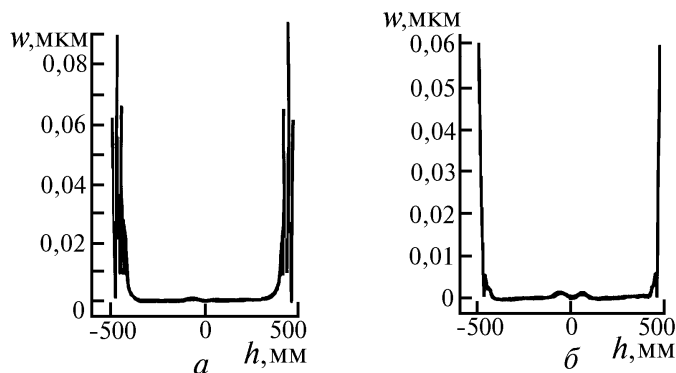


Рис. 2. График остаточной волновой aberrации системы Шмидта для корректоров, приведенных на рис. 1: а – для профиля 1; б – для профиля 2

Остаточная волновая aberrация во всех случаях не превышала 0,09 мкм на краю апертуры и 0,005 мкм на апертуре меньше 400 мм. Минимальной остаточная aberrация была для профиля корректора, изображенного на рис. 2, б: на краю апертуры не более 0,06 мкм, т.е. погрешность определения профиля поверхности не более $\lambda/6$ и при радиусе менее 480 мм не более 0,0038 мкм, т.е. погрешность в определении профиля поверхности не более $\lambda/167$.

Резко осциллирующее увеличение погрешности на краю апертуры можно объяснить краевыми эффектами вычислительного процесса. Этот эффект скорее всего следует отнести к погрешностям в расчете хода краевых лучей, однако для большей надежности результата возможно применение предложенного алгоритма на избыточной апертуре порядка 1,3 светового диаметра, с тем чтобы отбрасывать краевые точки.

В лидарной оптике применяются системы дифракционного качества, т.е. строящие дифракционное изображение предмета. Для такого рода систем величина допустимой суммарной деформации волнового фронта W_{\max} согласно критерию Рэлея не должна превышать $\lambda/4$. Этот критерий успешно применяется в случае, когда волновая aberrация имеет плавный вид [4].

В системе Шмидта есть три оптические поверхности, две из которых преломляющие, а одна отражающая; следовательно, коррекционная поверхность должна удовлетворять критерию $\lambda/12$. Полученные значения стрелки прогиба для planoида, изображенного на рис. 1 (кривая 2), были аппроксимированы по МНК, значения коэффициентов полинома вида (1) и соответствующая ошибка определения профиля корректора представлены в таблице.

Как видно из таблицы, критерий Рэлея выполняется в случае аппроксимации поверхности корректора при использовании десяти рассчитанных коэффициентов, в этом случае ошибка, вносимая поверхностью корректора, не превышает $\lambda/17$, что вполне удовлетворяет предъявленным требованиям. Соответствующее уравнение коррекционной пластины записывается в виде

$$z = 1,29 \cdot 10^{-2} y^2 + 1,80 \cdot 10^{-9} y^4 - 9,26 \cdot 10^{-21} y^6 + 9,13 \cdot 10^{-32} y^8 - 2,21 \cdot 10^{-42} y^{10} + 2,95 \cdot 10^{-53} y^{12} - 2,30 \cdot 10^{-64} y^{14} + 1,03 \cdot 10^{-75} y^{16} - 2,50 \cdot 10^{-87} y^{18} + 2,49 \cdot 10^{-99} y^{20}. \quad (10)$$

Зависимость ошибки определения профиля коррекционной поверхности Δd от порядка аппроксимирующего полинома (1)

Порядок полинома	Значения коэффициентов уравнения planoида					
	1	1,78 E - 02	1,52 E - 02	1,24 E - 02	5,17 E - 02	1,29 E - 02
2	1,79 E - 09	1,79 E - 09	1,80 E - 09	1,78 E - 09	1,80 E - 09	1,78 E - 009
3	7,40 E - 21	- 7,53 E - 21	- 8,10 E - 21	- 6,09 E - 21	- 9,26 E - 21	- 5,72 E - 021
4	6,98 E - 34	1,28 E - 33	2,06 E - 32	- 4,88 E - 32	9,13 E - 32	- 1,03 E - 031
5		- 1,13 E - 44	- 2,92 E - 43	8,81 E - 43	- 2,21 E - 42	3,23 E - 042
6		2,17 E - 56	2,01 E - 54	- 8,71 E - 54	2,95 E - 53	- 5,74 E - 053
7			- 6,78 E - 66	4,73 E - 65	- 2,30 E - 64	6,14 E - 064
8			8,86 E - 78	- 1,33 E - 76	1,03 E - 75	- 4,03 E - 075
9				1,50 E - 88	- 2,50 E - 87	1,58 E - 086
10					2,49 E - 99	- 3,41 E - 098
11						3,10 E - 110
$\Delta d, \text{ мкм}$	3,98 E - 01	4,08 E - 01	2,96 E - 01	2,08 E - 01	1,16 E - 01	7,36 E - 002
W_{max}	$\lambda/4,8$	$\lambda/4,8$	$\lambda/6$	$\lambda/9$	$\lambda/17$	$\lambda/26$

Выбор волновой aberrации в качестве оптимизируемого параметра позволил повысить качество, упростить процедуру коррекционного расчета оптической системы и существенно сократить временные затраты, а также снизить требования к ресурсам ЭВМ. Тот факт, что использование критерия минимума волновой aberrации позволяет более эффективно оптимизировать оптическую систему при небольших величинах волновой aberrации, был отмечен еще в [5]. Как показал расчет светосильной системы Шмидта, метод эффективен и при значительных величинах волновой aberrации.

В отличие от приведенной выше методики нахождения уравнения асферической поверхности, количество коэффициентов не задавалось, весь расчет был проведен для поверхности корректора, описываемой сплайнами. Следовательно, исключалась процедура выбора количества коэффициентов, что позволило отказаться от необходимости вмешательства оператора в процесс оптимизации системы.

Проведенные расчеты позволяют говорить о применимости данного метода для оптимизации светосильных оптических систем при значительной величине aberrаций. В настоящее время ведутся работы по расчету и экспериментальной проверке метода на более широком классе оптических систем.

1. Русинов М. М. Несферические поверхности в оптике. М: Недра, 1973. 296 с.
2. Вычислительная оптика: Справочник /М.М. Русинов, А.П. Грамматин, П.Д. Иванов и др. Под общ. ред. М.М. Русинова. Л.:Машиностроение, 1984. 423 с.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики /Пер. с англ. М.: Наука, 1973. С. 119.
4. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.
5. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1978. С. 534.

Конструкторско-технологический институт <Оптика> СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
13 января 1994 г.

N. S. Kirillov, I. G. Polovtsev. **Optimization of Schmidt System by a Compensating Way.**
An algorithm of fast Schmidt System optimization in order to obtain minimum of wave aberration is proposed in the paper, which guarantees finding of solution. The optimization results are discussed.