

Анализ возможностей построения анаберрационных и апланатических систем по двух-зеркальным схемам.

(обзор)

Г.А. Донцов¹, Г.С. Мельников², А.С. Попов³, А.А. Ошарин².

1 – ОАО «КМЗ», Москва, Россия,

2 – НП ОС «ТКС-оптика», Санкт-Петербург, Россия,

3 – LG soft lab, Санкт-Петербург, Россия.

В статье проводится анализ построения двухзеркальных схем исходя из возможностей реализации принципа Ферма. Рассматриваются известные решения Г.М. Попова, Д.Т. Пуряева, А.В. Гончарова, Г.С. Мельникова, А.С. Попова [1...5]. Приводятся конкретные решения по реализации как анаберрационных, так и апланатических систем.

Введение

Интерес к построению зеркальных оптических систем не ослабевал на протяжении всех периодов развития оптики. Зеркальные элементы обнаруживаются в раскопках ранних цивилизаций как зажигательные элементы, концентрирующие солнечное излучение. С развитием телескопостроения и установлением Исааком Ньютоном того факта, что хроматические aberrации во много раз превышают сферические aberrации (а как известно зеркальные объективы не создают хроматических aberrаций) в оптическом приборостроении постоянно ведутся поиски путей решения дилеммы «высокая светосила – слишком малое поле зрения систем». Настоящую статью авторы предлагают как обзор по методам построения анаберрационных двух зеркальных систем, корректоры для которых вычисляются по точным уравнениям, построенным на соблюдении принципа Ферма- равенства длин пути от точки источника к точке приема. Второй проблемой построения приемлемых зеркальных схем является центральное виньетирование

светового потока. Но и этот недостаток, как оказалось [6], можно обратить в существенное достоинство.

Сравнение известных схемных решений [1...5] с классическими схемами Кассегрена, Шмидта, Шварцшильда, Кретьена, Прихта, Максудова и других авторов - предлагавших для исправления комы строить рефлекторы с двумя или тремя зеркалами позволили выработать требования по построению высокотехнологичного объектива согласующегося с современными многоэлементными кремниевыми ПЗС матрицами.

1. Анаберрационные корректоры, основанные на выполнении требования Ферма.

При первом рассмотрении И. Ньютоном оптических систем с главным зеркалом сферической формы было доказано, что однозеркальные схемы будут всегда иметь сферические aberrации. Все последующие годы оптики искали конструктивные решения по введению в отраженные потоки от главного зеркала линзовых или зеркальных корректоров.

В двух зеркальных системах с исправленной сферической aberrацией поле зрения ограничено в первую очередь комой; астигматизм играет второстепенную роль.

При дальнейшем рассмотрении главным зеркалом будем называть первое по ходу луча зеркало; второе будем называть вторичным зеркалом или корректором.

Системы с анаберрационной коррекцией, т.е. оптические системы, формирующие безаберрационную коррекцию потока излучения поступающего на главное зеркало в фокусе на оптической оси.

В соответствии с подходом Г.М. Попова [1] рассмотрим общие принципы описания двух-зеркальных систем. Поместим начало декартовой системы координат (x,y) и полюс

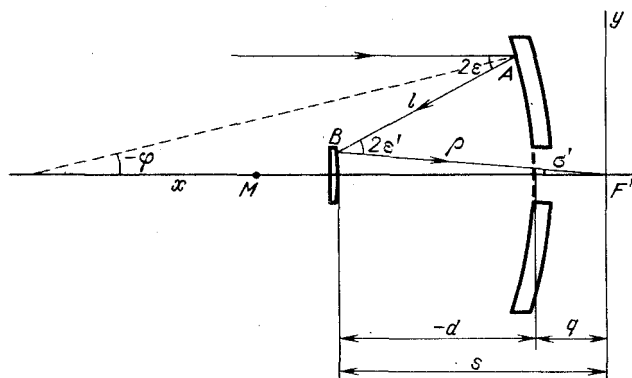


Рис. 1. Предфокальная система из двух зеркал кассегреновского типа; M — нейтральная точка

полярной системы (p, σ') в фокусе F' системы;

угол σ' отсчитывается от оси x по часовой стрелке для предфокальной системы и против часовой стрелки для зафокальной системы; границы изменения σ' — от 0° до 180° .

Заметим, что $q > 0$, если фокус F' находится справа от главного зеркала, и $q < 0$, если он расположен слева; $d < 0$ всегда (рис.1). Примем $\Gamma_0 = 1$;

тогда получим

$$y = \sin \sigma' + \psi(\sigma') \sin \sigma'. \quad (1)$$

Принцип Ферма позволяет написать условие получения безабберационного изображения на оси

$$x \mp l \mp p = \pm 2d, \quad (2)$$

где x — абсцисса точки пересечения A луча с главным зеркалом, $l = AB$, p — расстояние от точки пересечения луча со вторичным зеркалом до фокуса F' системы.

Г.М. Попов при описании способов построения анаберрационных систем из двух зеркал рассматривает только случай, когда предмет находится в бесконечности, (т.е. описывает аналитические способы построения анаберрационных и апланатических телескопов). Из геометрических построений по вышеописанной схеме Г.М. Попов образует систему из восьми дифференциальных уравнений, описывающих конструктивные элементы оптической системы. Эта система уравнений учитывает отступление от условий синусов (для частного случая), общий принцип Ферма для построения анаберрационных поверхностей и дифференциальный метод определения касательной кривой, заданной в полярных координатах.

Используя методы дифференциальной геометрии и условия существования единственного решения (Коши) для диф.уравнений, Г.М. Попов находит из системы уравнений декартовы координаты вторичного зеркала, а , затем, уточняет параметры главного зеркала. Как правило, поверхности этих зеркал, в результате, получаются асферическими, для которых определяются радиусы кривизны и квадраты их эксцентриситетов. В отдельных частных случаях по этой методике можно получить системы свободные от aberrаций комы, т.е. апланатические системы, включая системы высокой светосилы и системы с большими углами падения на зеркала.

В результате таких построений Г.М. Поповым найден ряд оригинальных схемных решений (см. Табл.1):

Табл. 1

	<p>Аналог системы Кассегрена</p>
	<p>Укорачивающая система с большими углами падения лучей на зеркала</p>
	<p>Система с необычной формой вторичного зеркала</p>
	<p>Система с необычным выпуклым вторичным зеркалом</p>
	<p>Система с малым вторичным зеркалом B, необычной формы (справа оно представлено в увеличенном виде)</p>

Схемные решения по построению двух-зеркальных оптических систем Г.М. Попова.

Недостатками указанного способа являются: трудности получения общих решений для двухзеркальных систем, формирующих изображения точки на конечном расстоянии, приближенное задание параметров асферических поверхностей отражателей, что

приводит к неопределенности результатов после изготовления отражающих поверхностей. Кроме того, способ Г.М. Попова не обеспечивает возможность построения систем близких к апланатическим с использованием фрактальных зон многократного отражения лучей от главного зеркала.

Вторым направлением по созданию двух-зеркальных систем с использованием принципа Ферма можно назвать результаты исследований Д.Т. Пуряева и А.В. Гончарова. Авторами публикации [2] рассмотрены два варианта схем телескопов с главным светосильным зеркалом: афокальная и фокусирующая системы, полностью исправленных на сферическую aberrацию для осевого пучка параллельных лучей. Расстояние между вершинами главного и вторичного зеркал точно равно половине радиуса сферического зеркала. В предельном случае относительное отверстие главного зеркала равно 1: 0.35, а длина телескопа вдоль оси в 2.8 раза меньше диаметра главного зеркала. На основе принципа Ферма Д.Т. Пуряеву и А.В. Гончарову удалось получить точные формулы, описывающие профиль вторичного зеркала в параметрическом виде (3-5):

$$Z = Z_2 / d = 4 v^2 (3(1+t) - 4vt - 8v^2) / (4v^2 + (1+t)(1-2v)^2), \quad (3)$$

$$Y = Y_2 / d = 8 v \sqrt{v(1-v)} ((1+t)(1-2v) - 4v^2) / (4v^2 + (1+t)(1-2v)^2), \quad (4)$$

$$\cot \gamma = 2 \sqrt{v(1-v)} (1+t - 2vt - 8v^2) / ((t + 4v + 2)(1-2v)^2 - 1), \quad (5)$$

постоянная $t = q / d$ есть приведенное расстояние между точками F и O_I . Также как и для варианта афокальной системы, можно показать, что вершинный радиус вторичного зеркала, расположенного в параксиальном фокусе главного зеркала, равен нулю.

К недостаткам схемных решений можно отнести следующее:

-поле зрения системы крайне ограничено aberrацией кома. Показано, что этот недостаток можно в некоторой степени скомпенсировать вращением вторичного зеркала либо вокруг его собственной вершины, либо вокруг центра кривизны главного сферического зеркала, которое остаётся неподвижным при сканировании пространства.

-профиль асферической поверхности вторичного зеркала не может быть представлен в виде стандартного ряда

$$Z = A_1 Y^2 + A_2 Y^4 + A_3 Y^6 + \dots + A_n Y^{2n} \quad (6)$$

Необычность формы профиля приводит к совершенно другому виду ряда, а именно: к степенному ряду с дробными степенями. Проводя аналогичные рассуждения, как и для случая с афокальной системой, авторы [2] показали, что профиль асферической поверхности вторичного зеркала описывается степенным рядом вида:

$$Z = \frac{3}{4} Y^{4/3} + \frac{(3+t)}{8(1+t)} Y^2 + \frac{(17+t)}{64(1+t)} Y^{8/3} + \frac{(5+2t)}{16(1+t)^2} Y^{10/3} + \frac{(911+110t-t^2)}{3072(1+t)^2} Y^4 + O[Y^{14/3}]$$

(7)

При t , стремящемся к бесконечности, этот ряд приобретает вид, совпадающей по форме со степенным рядом (6) для афокальной системы.

Табл. 2

	<p>Оптическая схема афокальной системы.</p>
	<p>Альтернативная двухзеркальная фокусирующая система с тремя отражениями.</p>
	<p>Оптическая схема фокусирующей системы</p>
	<p>Компактная двухзеркальная система субмиллиметрового телескопа.</p>
<p>Схемные решения по построению двух-зеркальных оптических систем Д.Т. Пуряева и А.В. Гончарова.</p>	

Схемы могут быть использованы в различных целях, таких как: изучение точечных источников, преобразование формы пучка лучей лазера, передача и приём инфракрасного излучения, индикация ошибок наведения телескопа. Следует отметить, что в схемных решениях Д.Т. Пуряева и А.В. Гончарова имеются подходы к описанию устройств с тремя отражениями от зеркал двух-зеркальной системы (см. строку 2, Табл. 2).

Однако общее описание возможностей построения анаберрационных и частично апланатических двух-зеркальных систем с возможностью использования режимов многократного отражения лучей, вероятно, надо считать подход, изложенный в статье [4] и Патенте РФ [5]. Данное описание позволило авторам предложить механическую аналогию и способы описания поверхностей анаберрационных и частично апланатических корректоров, задаваемых в точном параметрическом виде. Цель изобретения состояла в том, чтобы обеспечить возможность построения двух зеркальных, анаберрационных или близких к апланатическим (по крайней мере с полным устранением сферических aberrаций на главном зеркале и доведением aberrаций комы до пределов допуска) систем с любой выбранной светосилой и заданным относительным отверстием, при этом главное зеркало в получаемых системах представляет собой сегменты сферы (вогнутые или выпуклые) с телесным углом сегментирования большим 120° и его форма после расчетов не корректируется, что обеспечивает возможность создания систем с внутренним сканированием фокальными матрицами приемников излучения и оптической стабилизации изображений, создаваемых ими.

При этом, ставилась задача возможности точного задания поверхностей корректирующих зеркал, как в процессе расчетов схем, так и для их использования в программах для станков с числовым программным управлением в процессе изготовления рефлекторов, для любых возможных систем, таких, например, как: концентратор гомоцентрических потоков частиц, телескоп, объектив, микроскоп, осветитель, в том числе для систем, использующих любую фрактальную зону главного зеркала. Другими словами ставилась задача разработки способа построения анаберрационных корректоров для двухкомпонентных катоптрических систем с главным зеркалом сферической формы при одно- или многократном отражении от сферы гомоцентрических потоков лучей, исходящих из любой точки пространства предметов и собираемых с помощью таких контроотражателей в любую точку пространства изображений безабберационно. При этом форма и пространственное положение анаберрационных корректоров должна задаваться едиными для всех указанных случаев параметрическими уравнениями, а частные случаи

построения систем должны задаваться рядом численных условий на дискретные параметры уравнений.

В основе обобщенного способа построения двух зеркальных систем используется математическая программа, позволяющая одновременно представлять лучевую модель отражения гомоцентрических пучков лучей от главного рефлектора и плоских кривых, описывающих сечения каустик этих потоков, формируемых в любой заданной точке пространства, расположенного перед главным зеркалом. Параметрические уравнения каустик, для произвольных гомоцентрических потоков, отражаемых сферой, получены также из кинематической аналогии предложенной А.С. Поповым. В обобщенном виде они представляются параметрическими уравнениями (8)

$$\begin{aligned} X &= r \cos \varphi - s \cos (\varphi + a) \\ Y &= r \sin \varphi - s \sin (\varphi + a), \end{aligned} \quad (8),$$

Как следует из анализа выражений (8), эти выражения похожи на параметрические выражения для обыкновенных эпициклоид и представляют собой также алгебраические плоские кривые. Они получены прямым решением условия равенства геометрических длин путей для всех лучей исходного гомоцентрического потока, распространенного на каустики многократных отражений:

$$L_{\text{л}} = X_{\text{ист}} + 2r \cdot i + X_{\text{из}} = \text{Const} \quad (9),$$

Здесь: $L_{\text{л}}$ - суммарная длина каждого парциального луча, исходящего из точки источника, расположенного на расстоянии $X_{\text{ист}}=l$ от центра сферы, отражаемого от этой сферы i -раз и один раз от анаберрационного корректора и направляемого этим корректором в точку изображения, расположенную на расстоянии $X_{\text{из}}=l_{\text{из}}$ от центра сферы r . В результате для параметра s получено общее выражение (10)

$$s = \frac{(c^2 + (b_i)^2 - r^2 - d^2 - 2cb_i + 2dr \cdot \cos \varphi_i)}{2(c - b_i - r \cdot \cos \alpha + d \cdot \cos(\varphi_i + \alpha))} \quad (10)$$

$$b_i = b + (i - 1) \cdot a \quad \varphi_i = \varphi - \gamma_i \quad a = 2r \cos \alpha$$

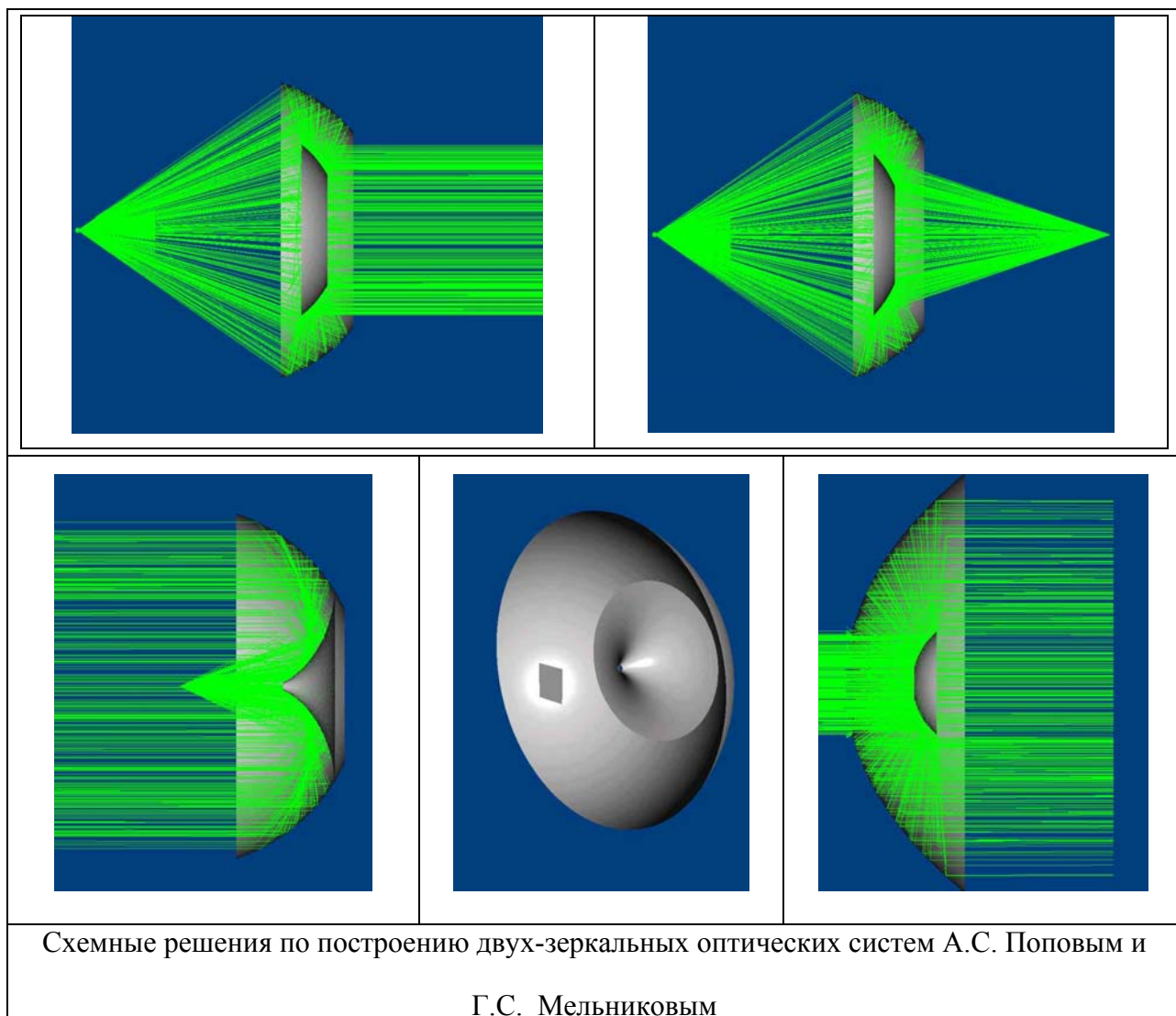
$$b = \frac{r - l \cdot \cos \varphi}{\cos \alpha} \quad \alpha = \arcsin\left(-\sin \varphi \frac{l}{b}\right)$$

i -число отражений луча от главного зеркала. Программа расчета с последующим введением подпрограммы представления компонентов системы в трех-мерной форме и прорисовки хода лучей позволяет создавать любые двух-зеркальные схемы с анаберрационной коррекцией. Ряд примеров оптических систем представлен в таблице 3.

Особый интерес представили оптические схемы с главным зеркалом выпуклой формы, такие, например, как представленные на Рис. 2.

Но несмотря, на большие надежды авторов обнаружить среди бесконечного множества анаберрационных двухзеркальных систем, построенных по уравнениям (10...12), систем с достаточно большим апланатизмом (исходя из соблюдения условий Девила-Саха), авторам удалось найти схемные решения для полей зрения не больших чем $20' \div 30'$.

Табл. 3.



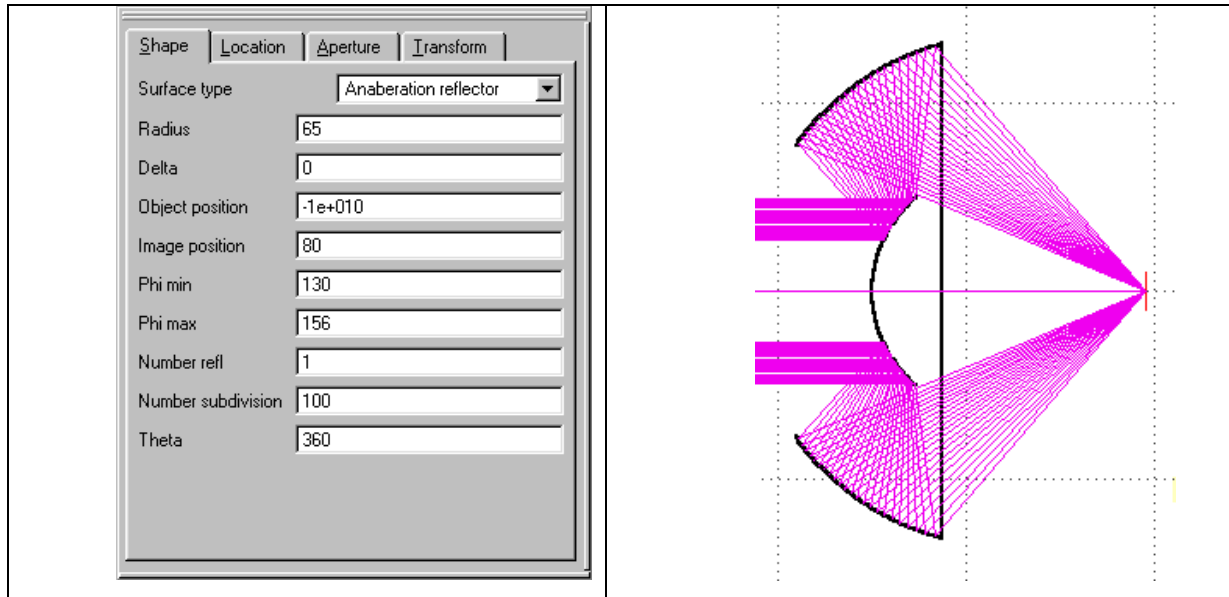


Рис.2. Вариант построения особо компактной светосильной системы ($D_{\text{эфф}}:F = 1:0,7$).

Главное зеркало выпуклая сфера. Вторичное зеркало - анаберрационный корректор (внешнее зеркало).

Как показано в работе [7] условия Девила-Саха, в принципе

$$y = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\sigma^*}{2}}{1 + t \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\sigma^*}{2}} \quad (11)$$

где t - параметр, определяющий величину комы, σ^* -последний угол (половинный угол встречи крайних лучей в точке $X_{\text{из}}$) При $t=0$ это выражение принимает вид

$$y = 2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\sigma^*}{2} \quad (12)$$

позволяют из бесконечного числа анаберрационных корректоров подбирать такие, которые бы обеспечивали заданный апланатизм системы. Однако, как показал опыт проверки синтезированных, в обозначенной выше программе, схемных решения целесообразнее конструирование систем вести по другому алгоритму, предложенному Г.А. Донцовым, а именно:

- первоначально в программе расчета двухзеркальных систем из геометрических и массогабаритных соображений строится система с корректором, форма которого определяется выражениями (10...12),
- далее из соображений технологичности изготовления выбирается вариант, в котором бы по геометрическому построению найденная схема

сохранялась. Сферический элемент двухзеркальной системы делают вогнутой формы, а на зеркальный элемент выпуклой формы в обычных расчетных программах с оптимизатором подбирается асферика высокого порядка с аппроксимацией при заданных полях зрения и условий, предъявляемых к полихроматической передаточной функции системы (как правило, удовлетворительным принимается ОПФ с диапазоном 0,4 – 0,7).

Дополнительным критерием оптимизации является параметр отступления профиля искомой асферики от ближайшей сферы. Из технологических соображений это отступление не должно превышать $30 \div 40$ мкм. Соблюдение этого требования, так же выдвинутого из технологических соображений возможности массового воспроизводства Г.А. Донцовым, иллюстрируется полученным профилем асферики, приведенным на Рис.3

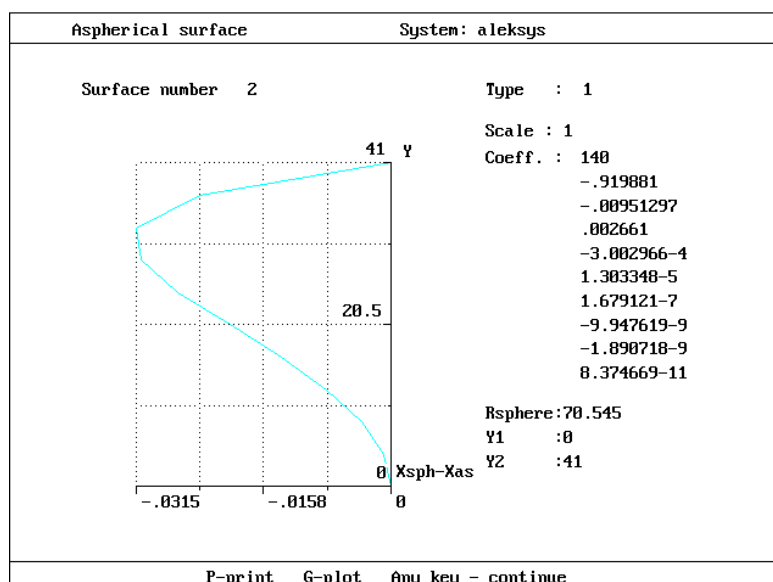


Рис.3. График отступления поверхности асферического элемента от ближайшей сферы.

По описанному алгоритму авторами построена уникальная двухзеркальная схема объектива, фокусирующегося на бесконечность (770 км) в плоскости предметов и обеспечивающая высококачественное формирование изображения с максимальным полем 2° на 2/3 дюймовую ПЗС матрицу с числом элементов 1000x1000.

Оптимизация схемы в расчетной программе Demos выполнена А.А. Ошариным. Ниже в табл. 4...6 сведены основные характеристики, aberrации и ОПФ.

Таблица 4.

ПАРАКСИАЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ
Фокусное расстояние $F'=65$ мм
Отн. отверстие $D/F'=1/.79$
Положение предмета $S=\infty$
Положение изображения $S'=-9.286$ мм
Полная длина системы $OL=195$ мм

Таблица 5.

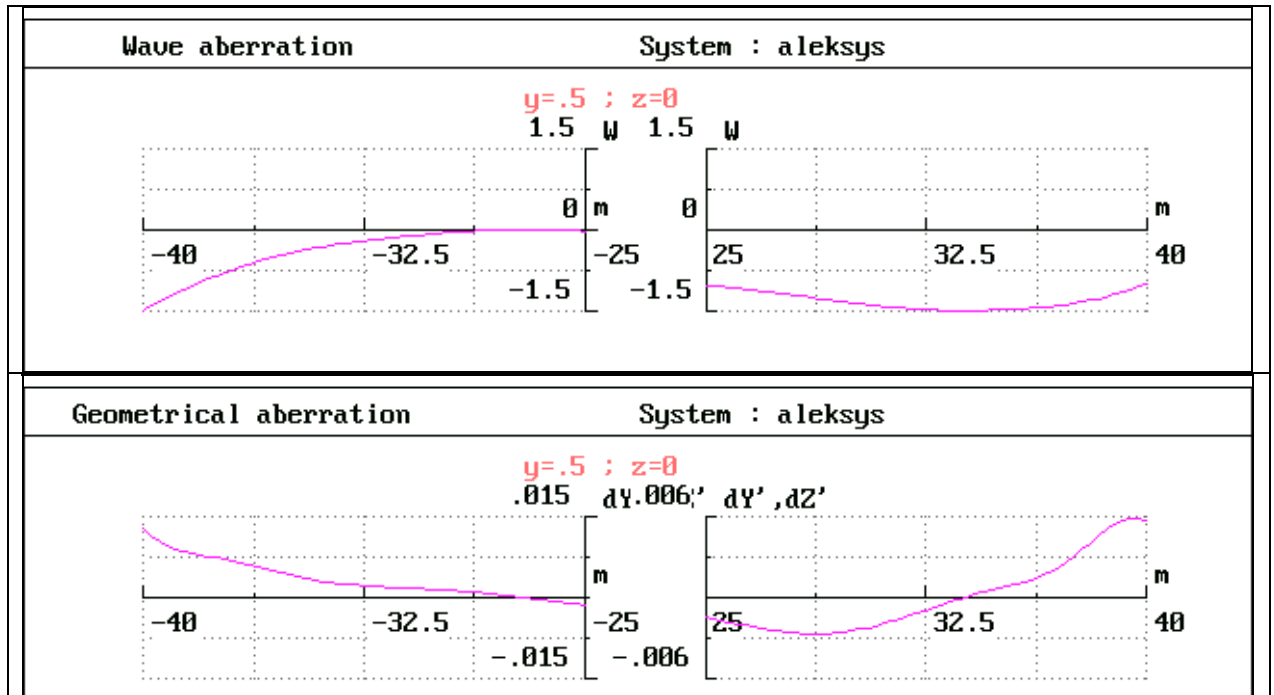


Таблица 6.

Поле: $W_y=0 \ W_z=0$ (град)			Поле: $W_y=.25 \ W_z=0$ (град)		
Частота 1/мм	Сечение		Частота 1/мм	Сечение	
	0	90		0	90
60.0	.815	.815	60.0	.786	.801
70.0	.801	.801	70.0	.766	.783
80.0	.788	.788	80.0	.745	.764
90.0	.772	.772	90.0	.724	.745
100.0	.756	.756	100.0	.704	.724
110.0	.739	.739	110.0	.683	.704
120.0	.721	.721	120.0	.663	.683
130.0	.704	.704	130.0	.644	.663
140.0	.688	.688	140.0	.625	.644

Поле: $W_y=.5 \ W_z=0$ (град)			Поле: $W_y=.75 \ W_z=0$ (град)		
Частота 1/мм	Сечение		Частота 1/мм	Сечение	
	0	90		0	90
60.0	.660	.705	60.0	.514	.566
70.0	.615	.663	70.0	.465	.500
80.0	.579	.624	80.0	.421	.444
90.0	.546	.588	90.0	.380	.395
100.0	.515	.552	100.0	.341	.352
110.0	.486	.519	110.0	.304	.314
120.0	.459	.487	120.0	.269	.280
130.0	.433	.456	130.0	.235	.250
140.0	.410	.428	140.0	.204	.224

Выводы:

1. Рассмотренные варианты построения двухзеркальных систем с анаберрационным корректором, форма которого вычисляется исходя из принципа Ферма – т.е. равенства длин оптических путей для всех лучей углового поля зрения показали, что наиболее универсальным алгоритмом построения является алгоритм по патенту РФ №21556979 «Способ создания двухзеркальных анаберрационных и апланатических систем с главным зеркалом в виде сегмента сферы», Ган М.А., Мельников Г.С., Попов А.С. (Патент на изобретение № 2155979 по Заявке № 98114691/28, приоритет от 21.07.1998г. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам №11 1999г. Патентообладатель Всероссийский научный центр «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»).

2. Подобный подход, также как и схемные решения Г.М. Попова, Д.Т. Пуряева, А.В. Гончарова, позволяет строить высокосветосильные анаберрационные системы с относительным отверстием $> 1:1$. В предельном случае при $\sin \sigma' = 1$ отношение может быть доведено до 1:0.35, при центральном виньетировании меньшем 0.33 и компактном исполнении – длина системы вдоль оси может быть в несколько раз меньше диаметра главного зеркала (в предельном случае в 2.8 раза).

3. Недостатком всех систем с глубокими сегментами главного сферического зеркала и анаберрационным корректором, вычисляемым из принципа Ферма, является малый диапазон угловых полей зрения обеспечивающих заданный апланатизм (т.е. построение систем формирующих изображение). Как правило, этот диапазон не превышает интервалы $0 \dots 30'$.

4. Для построения систем, обеспечивающих высококачественное изображение в диапазоне углов наблюдения до $0 \dots 2^\circ$, авторами предложен новый алгоритм их построения и приведены результаты проектирования двух-зеркальной системы с уникальными свойствами. (Расчетный вариант построения двух-зеркальных систем (с первым асферическим выпуклым зеркалом, при асферическом отклонении от ближайшей сферы не более 31,5 мкм и сферическим внешним корректором) обеспечивает поле зрения $1,5^\circ$, при угловом разрешением $\approx 0,001^\circ$.)

Список литературы

1. Попов Г.М. "Современная астрономическая оптика", М.: Наука, 1988 г., с.162.
2. D.T. Puryayev, A.V. Gontcharov, "Aplanatic four-mirror system for optical telescopes with a spherical primary mirror" *Opt. Eng.* **37**(8), 2334-2342 (1998).
3. Мельников Г.С., Попов А.С. «Каустические поверхности при отражении и преломлении сферой гомоцентрических пучков лучей», «Оптический журнал», т.65, № 4, с. 82...85 СПб, ГОИ, 1998.
4. Мельников Г.С., Попов А.С. Методы построения анаберрационных и апланатических приемо-передающих систем // Оптический журнал. 1999, т. 66, N 8.
5. Ган М.А., Мельников Г.С., Попов А.С.. Способ создания двухзеркальных анаберрационных и апланатических систем с главным зеркалом в виде сегмента сферы., Патент на изобретение № 2155979 по Заявке № 98114691/28, приоритет от 21.07.1998г. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам №11 1999г.
6. Донцов Г.А., Мельников Г.С., Попов А.С., Ошарин А.А. Описание способа построения новых комплексированных систем на базе предлагаемого универсального объектива. Настоящий сборник стр. ...
7. Davila P.M., Saha T.T.// *Appl. Opt.*-1984 -V.23, No.20- P.3660-3666.