

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.31

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВОВ-АПОХРОМАТОВ С РАЗНЕСЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ДЛЯ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ И КОЛЛИМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

© 2012 г. Т. Н. Хацевич, канд. техн. наук; В. Л. Парко, аспирант

Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск

E-mail: khatsevich@rambler.ru, vladimir-parko@yandex.ru

Описан алгоритм расчета объективов с разнесенными компонентами для телескопических и коллимационных систем. Приведены комбинации оптических стекол различных марок для объективов-апохроматов, полученных с использованием этого алгоритма. Подтверждена возможность получения апохроматической коррекции изображения с использованием недорогих технологичных стекол.

Ключевые слова: алгоритм, объектив, апохромат.

Коды OCIS: 080.3620

Поступила в редакцию 16.12.2011

Линзовые объективы астрономических приборов (преимущественно телескопов-рефракторов) традиционно характеризуются большими фокусными расстояниями и малыми угловыми полями. Достижимое в конкретной схеме ограничение по предельным оптическим характеристикам, таким как относительное отверстие или рабочий спектральный диапазон, часто обуславливается остаточными хроматическими aberrациями в изображении – хроматизмом положения, вторичным спектром, сферохроматическими aberrациями.

Со времен предложенного Л. Эйлером способ ахроматизации объективов были созданы различные методики расчета линзовых объективов, например, методика Г.Г. Слюсарева для расчета двухлинзовых склеенных объективов. Для более широкой области применения используются теории хроматизма и aberrаций третьего порядка. Ставшая уже классической теория рефракторов остается в настоящее время не только важной, но и привлекательной своими изящными идеями дисциплиной [1].

Следует отметить, однако, сложившийся стереотип, заключающийся в том, что апохроматической коррекции в линзовых объективах телескопических систем можно добиться

у объективов, состоящих минимум из двух линз (рис. 1), максимально близко расположенных к входному зрачку. При этом хотя бы одна линза должна быть выполнена из материала с “особыми” свойствами, главным образом – частной дисперсией. Для этих целей используются, например, стекла особый крон и особый флинт, флюорит, оптические жидкости. Ограничения по диаметрам заготовок, стоимости материалов, стойкости к внешним воздействиям и технологические трудности

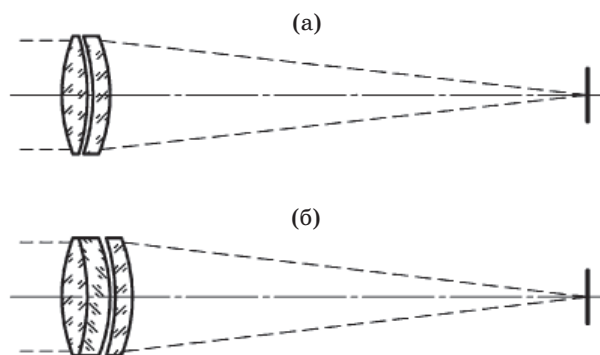


Рис. 1. Традиционные оптические схемы апохроматических объективов телескопических систем. а – дублет, б – триплет.

заставляют избегать применения таких материалов при расчете объективов астрономических приборов, ориентированных на серийное производство и использование технологичных, дешевых оптических стекол [1, 2].

В упомянутых методиках при выводе формулы для вычисления хроматизма положения оптических систем введено допущение, заключающееся в том, что изменение показателя преломления dn в пределах некоторой ограниченной области спектра (значительно меньшей, чем требуемый диапазон ахроматизации) принимается бесконечно малой величиной первого порядка малости и им пренебрегают. Такое допущение весьма упрощает как сами выводы, так и получаемые при этом формулы. В то же время практическое применение этих формул подтверждает правомерность этого допущения при расчете традиционных схем дублетов и триплетов ахроматических и апохроматических систем [3].

Однако из-за этого допущения реальный хроматизм положения изображения отличается от рассчитанного по известным формулам. Указанной методической погрешностью нельзя пренебречь при расчете многокомпонентных оптических систем, в которых расстояния между компонентами сопоставимы с фокусным расстоянием всей системы, а тем более, если хроматические aberrации каждого компонента не минимизированы и в системе в целом обеспечивается их взаимная компенсация. Выполненный поиск апохроматических пар стекол по таким методикам приводит к тому, что в процессе дальнейшей оптимизации объектива происходит не только уточнение значений радиусов кривизны, толщин, осевых расстояний, но и коррекция марок стекол для минимизации хроматизма положения изображения, что делает нецелесообразным предварительное проведение поиска базовой исходной схемы указанными методиками.

Авторы статьи столкнулись с этой особенностью традиционных методик при исследовании перспективной схемы апохроматического объектива для астрономических серийных телескопов (рис. 2а). Схемными отличиями

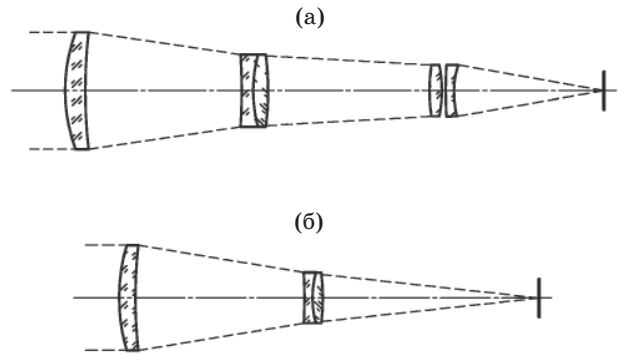


Рис. 2. Оптические схемы апохроматических объективов с разнесенными компонентами. а – трехкомпонентный объектив телескопа для серийного производства, б – двухкомпонентный объектив коллиматора.

таких объективов являются наличие в первом компоненте одиночной положительной линзы, вносящей наибольший вклад в оптическую силу всей системы, уменьшенный диаметр второго и третьего компонентов и использование оптических стекол двух марок. Для анализа возможностей исследуемой оптической системы была разработана ее математическая модель, учитывающая нелинейность изменения показателя преломления стекол при переходе от одной длины волны рабочего спектрального диапазона к другой, выработан алгоритм анализа этой модели, разработано программное обеспечение для его реализации [4, 5].

Для устранения хроматизма положения в видимом диапазоне спектра в оптической системе необходимо добиться равенства задних фокальных отрезков $S'_{F'}$ и $S'_{C'}$ линий F' и C' соответственно. При этом разница задних фокальных отрезков для линий $F'(C')$ и $e - S'_{F'}$ ($S'_{C'}$) и S'_e есть численное значение вторичного спектра оптической системы. Условием апохроматической коррекции является равенство

$$S'_{F'} = S'_e = S'_{C'}. \quad (1)$$

Задний фокальный отрезок S'_e трехкомпонентной системы определяется известным образом [6]

$$S'_e = \left(\frac{1 - \Phi_1 d_1}{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1} - d_2 \right) / \left[\Phi_3 \left(\frac{1 - \Phi_1 d_1}{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1} - d_2 \right) + 1 \right], \quad (2)$$

где d_1, d_2 – расстояния, соответственно, между первым и вторым, вторым и третьим компонентами системы, Φ_1, Φ_2, Φ_3 – оптические

силы для линии e спектра, соответственно, первого, второго и третьего компонентов системы.

Задние фокальные отрезки $S'_{F'}$ и $S'_{C'}$ вычисляются аналогично (1) для соответствующих оптических сил.

Проверка апохроматической коррекции системы проводится в соответствии с неравенством

$$|S'_{F'} - S'_e| \pm |S'_{C'} - S'_e| \leq K, \quad (3)$$

где K – максимально допустимое значение остаточного хроматизма изображения.

Известно, что у лучших объективов-ахроматов вторичный спектр составляет $1/2000$ фокусного расстояния системы [7]. Практика расчетов апохроматических объективов подтверждает правомерность принятия для них значения параметра K , равного $1/3000$.

В реальных объективах, предназначенных для видимого диапазона спектра, апохроматическая коррекция может обеспечиваться для длин волн, несколько отличающихся от указанных. Поэтому неравенство (3) дает своеобразный допуск, определяемый параметром K , позволяющий такие апохроматы выявить при анализе.

Предлагаемый алгоритм расчета объективов с разнесенными компонентами представлен на рис. 3 и состоит из следующих четырех основных этапов [8, 9]:

1. Задание стекол двух марок, определение их последовательности и задание параметрического пространства для последующих расчетов. Предусматривается задание различных ограничений для системы, например: диаметр второго компонента должен быть менее половины диаметра первого компонента. Введенные ограничения позволяют отбросить при анализе “нетехнологичные” схемные варианты, но вместе с тем сокращают диапазон значений оптической силы Φ_1 .

2. Выполнение габаритного расчета системы с использованием формулы (2) для линии e спектрального диапазона, в ходе которого определяются оптические силы компонентов, расстояния между ними, задний фокальный отрезок S'_e .

3. Расчет оптических сил отдельных линз в компонентах, вычисление задних фокальных отрезков $S'_{F'}$ и $S'_{C'}$ по формулам, аналогичным (2), для линий F' и C' соответственно.

4. Проверка условия апохроматической коррекции системы в соответствии с неравенством (3): если оно выдержано, то расчет можно завершить, в противном случае – повторить его, начиная с этапа 2 или 3.

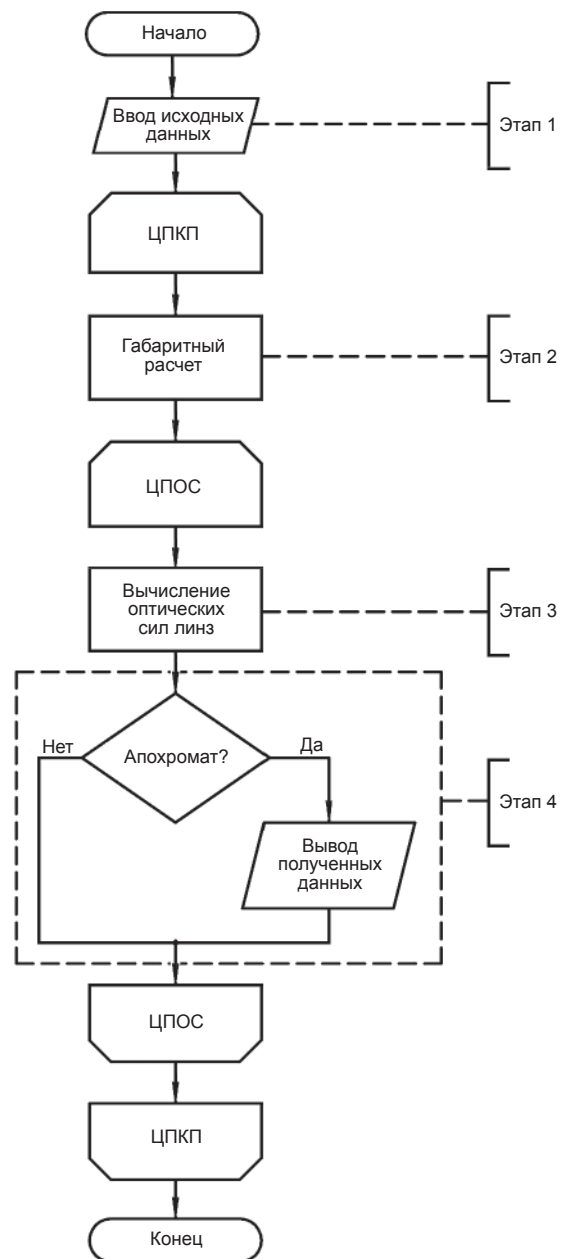


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета объективов с разнесенными компонентами. ЦПКП – цикл перебора конструктивных параметров. ЦПОС – цикл перебора оптических сил.

Необходимо отметить, что в математической модели учитывается только устранение хроматизма положения системы, во внимание принимается исключительно осевой пучок лучей для бесконечно тонких линз.

По предложенному алгоритму были проанализированы стекла 84 марок и выявлены их комбинации, обеспечивающие апохроматическую коррекцию изображения в объективе с разнесенными компонентами.

Был введен ряд ограничений, отражающих массогабаритные и технологические требования. Это ограничения на расстояния между компонентами, на диаметры (диаметр второго компонента не превышает половину диаметра первого, диаметр третьего меньше либо равен диаметру второго), ограничение на относительные оптические силы компонентов, равное ± 10 , во избежание крутых радиусов кривизны преломляющих поверхностей. Параметр K был принят равным $1/3000$.

Результаты получены в виде таблиц апохроматических пар стекол с соответствующими им оптическими силами компонентов, осевыми расстояниями и прочими оптическими характеристиками системы.

Некоторые апохроматические пары приведены в таблице. Для анализа был выбран каталог SCHOTT, в силу обширности номенклатуры марок стекол. В столбце № 4 таблицы представлены стекла четырех марок, составляющие апохроматическую пару для стекла 1 столбца № 1, удовлетворяющие неравенству (2).

Из таблицы видно, что выявлены два принципиальных варианта построения схемы, обусловленных материалом линзы первого, обладающего наибольшей оптической силой в системе, компонента: первый одиночный компонент выполняется из стекол кроновой группы или из стекол флинтавой группы. Для случая кроновой группы наилучших резуль-

Пары стекол трехкомпонентных объективов-апохроматов

Стекло 1	n_e	v_e	Стекло 2	n_e	v_e	Δn_e	Δv
N-FK51	1,488	84,074	N-LASF43	1,811	40,362	-0,323	-43,712
			N-LASF31A	1,888	40,515	-0,400	-43,559
			N-LAF36	1,840	42,885	-0,352	-41,189
			N-LASF41	1,804	42,116	-0,316	-41,958
N-PK52A	1,498	81,212	N-LASF43	1,811	40,362	-0,312	-40,850
			N-LASF31A	1,888	40,515	-0,390	-40,697
			N-LAF36	1,804	42,116	-0,306	-39,096
			N-LASF41	1,840	42,885	-0,341	-38,327
N-PK51	1,530	76,581	N-LASF43	1,811	40,362	-0,281	-36,219
			N-LASF31A	1,888	40,515	-0,358	-36,066
			N-LAF36	1,840	42,885	-0,309	-33,696
			N-LASF41	1,804	42,116	-0,274	-34,465
N-SF11	1,792	25,473	N-BK10	1,500	66,780	0,292	41,307
			N-BAK2	1,542	59,440	0,250	33,967
			N-LAK21	1,643	59,858	0,149	34,385
			N-FK5	1,489	70,225	0,303	44,752
SF6	1,813	25,237	N-BK10	1,500	66,780	0,313	41,544
			N-BK7	1,519	63,961	0,294	38,725
			N-FK5	1,489	70,225	0,324	44,989
			N-PSK3	1,554	63,234	0,258	37,997
N-SF4	1,7616	27,159	N-BK10	1,500	66,780	0,262	39,622
			N-FK5	1,489	70,225	0,272	43,066
			N-PSK3	1,554	63,234	0,207	36,075
			N-BK7	1,519	63,961	0,243	36,803
N-SF57	1,855	23,589	N-BK10	1,500	66,780	0,355	43,191
			N-ZK7	1,510	60,982	0,345	37,393
			N-LAK22	1,654	55,627	0,201	32,038
			N-SK16	1,623	60,076	0,232	36,487

Продолжение таблицы

Стекло 1	n_e	v_e	Стекло 2	n_e	v_e	Δn_e	Δv
SF10	1,734	28,188	N-BK10	1,500	66,780	0,235	38,593
			N-FK5	1,489	70,225	0,245	42,038
			N-PSK53	1,622	63,189	0,112	35,001
			N-PK52A	1,498	81,212	0,236	53,024
SF1	1,723	29,290	N-FK5	1,489	70,225	0,234	40,935
			N-PK51	1,530	76,581	0,193	47,291
			N-PK52A	1,498	81,212	0,225	51,922
			N-FK51	1,488	84,074	0,235	54,784
F5	1,607	37,766	N-FK51	1,488	84,074	0,119	46,309
			N-PK52A	1,498	81,212	0,109	43,446
			N-PK51	1,530	76,581	0,077	38,816
			N-BAK2	1,542	59,440	0,065	21,674

Примечание. n_e – показатель преломления стекла, v_e – коэффициент дисперсии.

татов можно добиться, если первая линза изготавливается из легкого крона N-FK51 или фосфатных кронов N-PK51, N-PK52A. Схемы на их основе обладают большим оптимизационным потенциалом и, вместе с тем, высокой стоимостью.

Для вариантов, в которых первый одиночный компонент выполняется из стекол флинт-овой группы, первую одиночную линзу лучше изготавливать из тяжелых флинтов: N-SF4, SF6, SF10, N-SF11, N-SF57 и SF1.

Очевидно, что применение такой достаточно сложной схемы апохроматического объектива экономически целесообразно только в том случае, если удастся ее осуществить из дешевых стекол. Анализ показал, что имеются варианты со стеклами массовых и, соответственно, дешевых марок, например, такие пары как SF6/N-BK7 и SF1/N-FK5. Следует обратить внимание, что для анализируемой схемы найдены пары стекол без особого хода дисперсии в них, обеспечивающие апохроматическую коррекцию изображения, например пара F5/N-BAK2.

Несмотря на то, что расчет проводится только для осевого пучка лучей, дальнейшая оптимизация найденных решений по современным проектировочным программам дает результат, максимально приближенный к исходному, в частности по набору марок стекол в схеме. Как показала практика расчетов телескопических объективов по данной схеме, достижимыми являются системы с параметрами от-

носительного отверстия 1/7 и угловым полем 1,5°, работающие в видимом спектральном диапазоне от 420 до 700 нм. Качество изображения при этом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к серийно выпускаемым астрономическим телескопам. Остаточный хроматизм положения достигает менее 1/3500 от значения фокусного расстояния.

Отметим, что третий компонент системы предназначен для исправления полевых аберраций. Если же угловое поле мало, что имеет место в объективе коллиматора, то для обеспечения апохроматической коррекции достаточно оставить в схеме только первые два компонента (рис. 26). Алгоритм расчета таких объективов аналогичен представленному на рис. 3.

Расчет апохроматического двухкомпонентного объектива коллиматорного типа иллюстрируется следующим числовым примером для пары массовых стекол SF57 и N-BK7: первый компонент выполнен из стекла SF57, его относительная оптическая сила 0,91; относительная оптическая сила первой линзы во втором компоненте равна -6,98, второй линзы - 7,17; расстояние между компонентами составляет 0,59 доли эквивалентного фокусного расстояния, а общая длина системы соответствует 1,05 доли. Необходимо отметить, что обе линзы во втором компоненте обладают большими относительными оптическими силами, в то время как относительная оптическая сила второго компонента равна 0,19.

Проверочный расчет в программе моделирования оптических систем подтверждает апохроматическую коррекцию рассчитанного объектива в видимом спектральном диапазоне. При фокусном расстоянии 1000 мм остаточный хроматизм системы составляет 0,29 мм, что соответствует 1/3400 фокусного расстояния. Для относительных отверстий менее 1/10 в видимом спектральном диапазоне рассчитанный объектив является дифракционно ограниченным.

Экономический эффект от построения апохроматических объективов по обсуждаемым в статье схемам оправдан только в тех случаях, когда в них используются дешевые, тех-

нологичные марки стекол. Несмотря на более сложную юстировку и конструкцию трубы телескопа, себестоимость производства трехкомпонентного апохромата с диаметром объектива 125 мм оказывается в два раза ниже, чем у апохроматов, выполненных по классической схеме с использованием стекол с особым ходом дисперсии. При этом качество изображения объектива не уступает традиционным схемам с “особыми” стеклами и эквивалентными оптическими характеристиками системы. Полученные решения могут представлять интерес для производителей серийных астрономических телескопов и объективов коллиматорного типа.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Г.М. Современная астрономическая оптика. М.: Наука, 1988. 192 с.
2. Грамматин А.П., Цыганок Е.А. Особенности вторичного спектра объективов коллиматоров, работающих в диапазоне длин волн 400–900 нм // Изв. Вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 9. С. 75–77.
3. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 383 с.
4. Парко В.Л., Хацевич Т.Н. Апохроматический объектив // Патент России № 2429508. 2011.
5. Парко В.Л., Парко К.Л. Расчет АПО // Программа для ЭВМ России № 2011612810. 2011.
6. Дубовик А.С., Апенко М.И., Дурейко Г.В., Жилкин А.М., Запругаева Л.А., Романов Д.А., Свешникова Д.С. Прикладная оптика / под ред. Дубовика А.С. М.: Недра, 1982. 612 с.
7. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1978. 543 с.
8. Парко В.Л. Способ устранения хроматизма положения в объективах телескопических систем // Сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса “ГЕО-Сибирь-2011”. Новосибирск, 2011. Т. 5. Ч. 1. С. 15–19.
9. Парко В.Л., Хацевич Т.Н. Алгоритм выбора апохроматических пар стекол в многокомпонентном астрономическом объективе // Вестник СГГА. 2010. В. 2(13). С. 69–73.