

Автоматизация синтеза и ранжирование склеенного и расклеенного двухлинзовых объективов

З.Х. Нгуен¹, А.В. Бахолдин¹

¹ *Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

В работе представлен алгоритм синтеза склеенного и расклеенного двухлинзовых объективов. Представлено описание программы синтеза двухлинзовых объективов из материалов задаваемого пользователем каталога. Рассмотрена специфика автоматизации синтеза таких объективов. Предложен подход к ранжированию рассчитанных вариантов двухлинзовых систем по критерию предварительной оценки, определяемому через основные параметры в рамках теории аберраций третьего порядка. Разработанная программа поможет инженеру-оптику быстро рассчитать склеенные и расклеенные двухлинзовые объективы с требуемыми характеристиками.

Ключевые слова: расчет оптических систем, синтез объектива, аберрации третьего порядка, склеенный объектив, расклеенный объектив.

Цитирование: Нгуен, З.Х. Автоматизация синтеза и ранжирование склеенного и расклеенного объективов / З.Х. Нгуен, А.В. Бахолдин // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 1. – С. 83-89. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-923.

Citation: Nguyen DH, Bakholdin AV. Automation of synthesis and ranking of cemented and air-spaced doublets. Computer Optics 2022; 46(1): 83-89. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-923.

Введение

Двухлинзовые склеенные и расклеенные объективы часто применяются в оптическом приборостроении благодаря простоте, своим коррекционным возможностям и технологичности изготовления. Они могут служить самостоятельными объективами телескопических систем, а также являться частью составных объективов в сложных системах, таких как, например, симметричные окуляры, оборачивающие системы [1], компоненты светосильных объективов или микрообъективов [2, 3]. При синтезе двухлинзовых объективов широко применяется методика Г.Г. Слюсарева [4]. В [5] представлена расширенная методика синтеза двухлинзовых склеенных объективов с асферическими поверхностями второго порядка.

Качество рассчитанных объективов во многом зависит от удачного выбора материалов. Процесс выбора материалов требует много времени, но не всегда гарантирует хороший результат. Для упрощения процесса выбора С.В. Трубно разработал таблицы [6], помогающие выбрать пары стекол при заданных аберрационных характеристиках в видимом диапазоне спектра. Применение таблиц С.В. Трубно имеет ряд недостатков [7], среди которых можно назвать следующие:

- таблицы рассчитаны для видимого спектра;
- таблицы содержат только марки стекол, выпускавшиеся оптическими заводами в то время;
- нет возможности сравнивать различные пары.

Для устранения этих недостатков был разработан алгоритм автоматического синтеза и анализа склеенного объектива, представленный в работах [7, 8].

Анализ представленного алгоритма синтеза двухлинзового объектива показал, что:

- отсутствует алгоритм автоматического синтеза расклеенных объективов;
- отсутствует система ранжирования рассчитанных объективов по критериям качества.

В данной работе представлен алгоритм автоматического синтеза тонкого склеенного и расклеенного объективов с учетом технологичности и предложена система ранжирования рассчитанных объективов по критериям качества.

1. Синтез склеенного объектива

В методике Г.Г. Слюсарева используются следующие аберрационные параметры [1, 4]:

- P – параметр, определяющий сферическую аберрацию;
- W – параметр, определяющий кому;
- C – параметр, определяющий хроматическую аберрацию положения.

Задача синтеза заключается в нахождении конструктивных параметров системы, у которой $P=P_0$, $W=W_0$, $C=C_0$, где P_0 , W_0 , C_0 – заранее заданные разработчиком значения (обычно они равны нулю или слабо отличаются от него). Уравнения $P=P_0$ и $W=W_0$ представляют собой уравнение второго и первого порядка соответственно относительно инварианта склейки Q . Так как для склеенного объектива существует только три свободных конструктивных параметра, в объективах телескопических систем обычно устраняют только две аберрации, чаще всего это сферическая аберрация $P=0$ и хроматизм положения $C=0$. В этом случае величина комы (W) будет произ-

вольная. Следует отметить, что уравнение $P = P_0$ не всегда имеет действительные корни.

Согласно выше перечисленным условиям, невозможно обеспечить получение заданного значения параметра W . В работе происходит полный перебор всех возможных сочетаний марок стекол из заданного каталога. При таком подходе рассчитываются значения W и сохраняются те варианты, в которых значение W наименее отличается от требуемого W_0 . Также известно, что чем больше разность чисел Аббе между материалами $|\Delta v| = |v_1 - v_2|$, тем меньше оптические силы отдельных линз, соответственно, тем меньше кривизны поверхностей линз. Увеличение радиусов кривизны приводит к уменьшению aberrаций высших порядков. В [9] даётся рекомендация выбирать модули радиусов кривизны больше 20% от фокусного расстояния, чтобы избежать трудностей при изготовлении. В [10] дают рекомендации по подбору материалов комбинации и по вычислению поправок для компенсации сферической aberrации пятого порядка и сферохроматизма. В данной работе в случае расчета всех возможных вариантов пользователь может выбрать оптимальное решение по любому значимому для него критерию.

Система ранжирования

В работе [11] представлено выражение для волновой aberrации оптической системы в случае предмета, расположенного на бесконечно большом расстоянии:

$$w = a(f')^n \lambda^m k^l, \tag{1}$$

где f' – фокусное расстояние, λ – основная длина волны, k – диафрагменное число, a – коэффициент пропорциональности (для каждой комбинации марок стекол склеенного объектива он имеет уникальное значение). Несмотря на то что при известных значениях f' , λ , k и a формула (1) позволяет быстро получить значение волновой aberrации, её применение характеризуется следующими недостатками:

- Для определения степеней n, m, l необходимо исследовать конкретную комбинацию стекол при разных значениях f', λ, k в какой-либо программе автоматизированного проектирования оптических систем.
- Коэффициент пропорциональности a может быть найден только после определения степеней n, m, l .
- После добавления новой марки стекла в рабочий каталог придется повторять все выше перечисленные процедуры для новых комбинаций марок стекол, что требует много времени и сил.

Таким образом, актуальной является разработка новой системы ранжирования рассчитанных склеенных объективов, не прибегая к вычислению волновой aberrации. Известно, что на величины aberrаций высших порядков большое влияние оказывают ради-

ус склеиваемой поверхности R_2 , инвариант склейки Q , параметр P_2 на склеиваемой поверхности [1]. Кроме того, иногда для склеенного объектива требуется выполнить апланатическую коррекцию ($P=0$ и $W=0$). Из анализа влияния параметров на изображение предлагается зависимость для предварительной оценки PE (Preliminary Evaluation) качества склеенного объектива:

$$PE(P_2, W, R_2) = (|P_2| \cdot 3^{|W|}) / R_2^2. \tag{2}$$

В (2) не входит инвариант склейки Q , но он заменен обратной зависимостью от R_2 . Для обеспечения апланатической коррекции параметр W должен стремиться к нулю. Мерой качества изображения рассчитанных объективов на начальном этапе синтеза принята величина радиуса пятна рассеяния осевой точки.

Наилучший вариант рассчитанного склеенного объектива имеет минимальное значение предварительной оценки PE .

2. Синтез расклеенного объектива

Наряду со склеенными объективами, также применяют расклеенные объективы в оптическом приборостроении. У них на один свободный параметр больше, благодаря этому можно получить требуемые значения параметров P, W, C при любой комбинации стекол. Стоит отметить, что расклеенный объектив характеризуется нестабильной центрировкой [12], и их производство менее технологично по сравнению со склеенными объективами. Существуют различные методики синтеза расклеенного объектива. В [9] представлен метод, заключающийся в решении системы из трех уравнений $S_1 = S_2 = C_1 = 0$, где S_1, S_2, C_1 – первая, вторая монохроматическая и первая хроматическая суммы Зейделя. В данной работе при синтезе расклеенного объектива использована методика Г.Г. Слюсарева [1, 4].

Система ранжирования

Для определения зависимости предварительной оценки расклеенных объективов учитывается следующее соображение: согласно правилу Берека [13] большие значения aberrаций высших порядков обычно вносятся поверхностями с большими значениями (по модулю) коэффициентов P_i, W_i, C_i [1]. При том, что

$$\sum_{i=1}^k P_i = P_0,$$

сами слагаемые могут быть любыми. Если они принимают большие значения, то при изготовлении небольшое отклонение любого параметра приведет к существенному ухудшению качества изображения, создаваемого системой в целом.

В работе предложена зависимость для предварительной оценки качества изображения расклеенного объектива:

$$PE(P_1, P_2, P_3, P_4) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |P_i| = \overline{|P_i|}. \quad (3)$$

Наилучший вариант расклеенного объектива имеет минимальное значение предварительной оценки PE .

3. Алгоритм автоматического синтеза склеенного и расклеенного объективов

В каждом из разработанных алгоритмов входными данными являются:

- Спектральные параметры (рабочий диапазон и основная длина волны).
- Каталог материалов (возможно задание первого материала).
- Фокусное расстояние f^* [мм].
- Угловое поле в пространстве предметов 2ω [град].
- Диаметр входного зрачка D [мм] (рассмотрен случай расположения на первой поверхности первой линзы).
- Требуемые значения параметров P_0, W_0, C_0 .
- Для склеенного объектива – желаемое количество вариантов объективов к отображению на экран N (4, 8, 12, 16, 32, 100, All). Из практики работы программы замечено, что расчет всех вариантов происходит быстрее, чем процесс вывода полного списка результатов на экран. Поэтому целесообразно дать пользователю возможность ограничить список отображаемых вариантов системы. Для расклеенного объектива это ограничение не актуально, потому что при любых комбинациях материалов всегда есть решения для апланатической коррекции ($W = W_0$).
- $\text{Min}(|\Delta v|)$: наименьший модуль разности чисел Аббе материалов (если пользователь желает уменьшить количество пар и ускорить процесс работы программы).
- Max_PE : максимальное значение предварительной оценки (если пользователь желает уменьшить количество пар и ускорить процесс работы программы).

В качестве каталога используемых материалов загружаются каталоги с расширением «.agf» программы OpticStudio/Zemax [14]. Можно использовать встроенные каталоги и редактировать их.

Обобщенный алгоритм синтеза представлен на рис. 1. Алгоритм синтеза склеенного объектива работает следующим образом:

- Чтение каталога стекол, сохранение массива марок стекол $\text{glass_arr}[]$, создание массива $\text{doublet_res}[]$ для хранения результатов.
- Полный перебор всех материалов каталога «каждое с каждым» происходит в цикле, который содержит следующие операции:
 - + Если $|v_1 - v_2| < \text{Min}(|\Delta v|)$, происходит переход к следующей паре. Условие введено для ускорения

работы программы и может регулироваться пользователем.

+ Решение уравнения $C = C_0$, тогда $\varphi_1 = v_1(1 + v_1 C_0) / (v_1 - v_2)$ и $\varphi_2 = 1 - \varphi_1$. На этом этапе решается задача ахроматизации объектива.

+ Решение уравнения второго порядка $P = P_0$ коррекции сферической аберрации. Если уравнение не имеет действительных корней, то происходит переход к следующей паре материалов. Аналитические соотношения подробно описаны в [1], а в [15] рассмотрен пример синтеза.

+ Вычисление параметров P_i, W_i и C_i на каждой поверхности, хроматизма положения $LCA = \sum h_i C_i$, первой суммы Зейделя $S_1 = \sum h_i P_i$, параметра W .

+ Вычисление конструктивных параметров: радиусов кривизны R_i , осевых расстояний d_i . В данной работе толщины линз вычисляются по формулам тонкой линзы, как рекомендовано в [1]. Также реализован контроль острого края положительных линз – их полувысота ($D/2$) должна быть заведомо меньше модуля радиуса кривизны R каждой поверхности: $|R| > D/2$. В программе производится предварительная проверка соответствия условию, и если оно не выполняется, то происходит переход к следующей паре материалов.

+ Вычисление предварительной оценки (PE). Для случая склеенного объектива по формуле (2), а для расклеенного – по формуле (3). Ранжирование полученных вариантов происходит по величине предварительной оценки (PE) по возрастанию от лучшего варианта к худшему.

+ Проверка условия допустимой максимальной ошибки. Если предварительная оценка PE более Max_PE , то происходит переход к новой паре. Условие введено для ускорения работы программы и может регулироваться пользователем.

+ Проверка каждого рассчитанного варианта склеенного объектива к отображению на экран. Если $\text{size}(\text{doublet_res}[]) < N$: сохранить в массив результатов текущий вариант объектива и перейти к следующей паре материалов. В случае $\text{size}(\text{doublet_res}[]) \geq N$ производится дополнительная проверка: если существует любая пара pair , удовлетворяющая условию $|W_{\text{текущей пары}} - W_0| < |W_{\text{pair}} - W_0|$, то текущий вариант будет сохранен, а пара с наихудшей разницей будет удалена из списка к отображению. Далее происходит переход к следующей паре материалов. Для расклеенного объектива эта проверка не выполняется.

В процессе расчета всех вариантов в алгоритме предусмотрен счет количества удачных вариантов, нахождение минимального значения предварительной оценки и определение времени синтеза.

Алгоритм синтеза расклеенного объектива аналогичен алгоритму для склеенного объектива, за исключением того, что все рассчитанные решения предоставляются к отображению на экран.

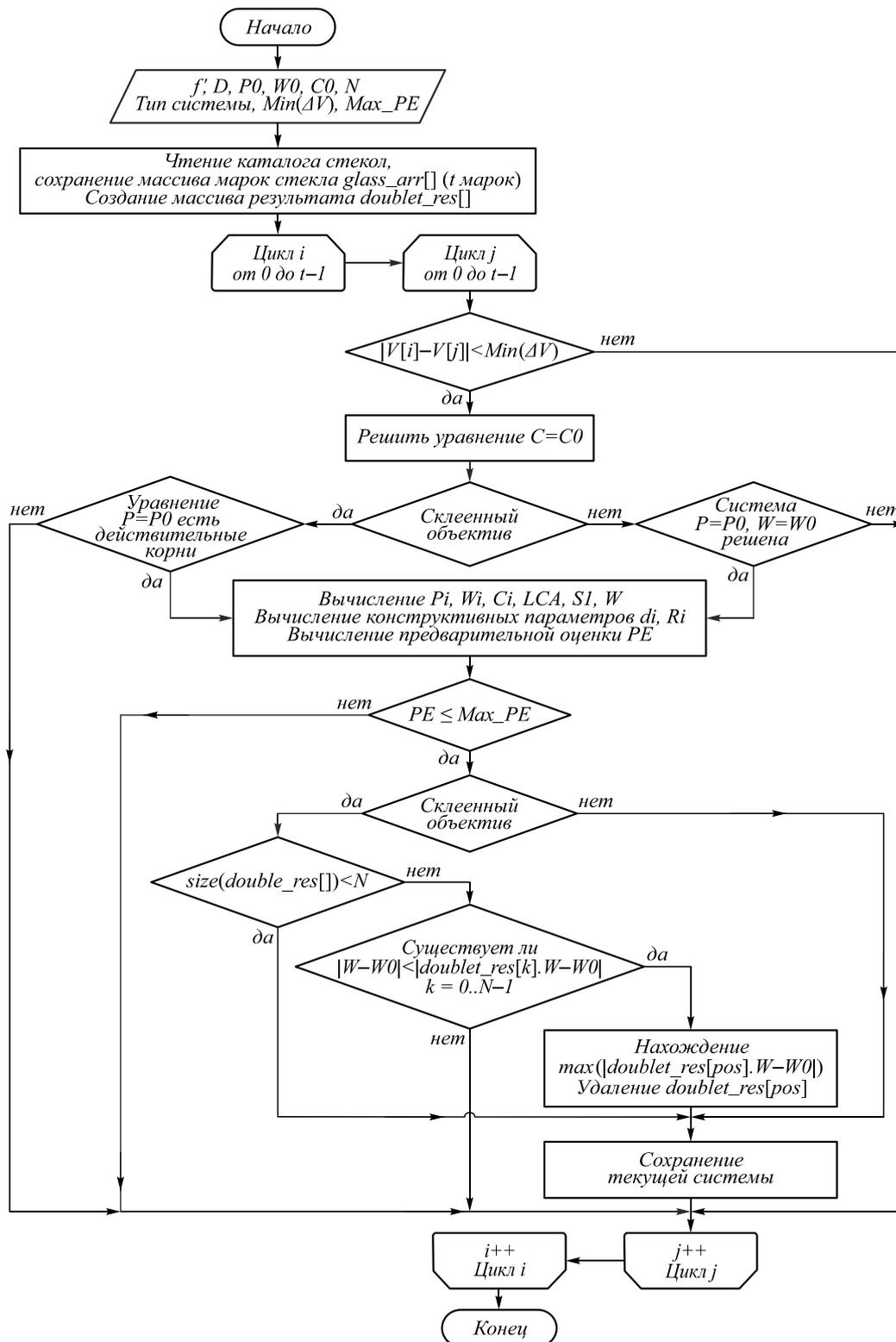


Рис. 1. Блок-схема разработанного алгоритма

4. Пример работы предложенной программы

На основе предложенного алгоритма была разработана программа для автоматического синтеза и ранжирования склеенного и расклеенного объективов. Программа позволяет пользователю задать

требуемые данные и ограничения, результаты расчета выводятся в таблицу для удобного рассмотрения. В программе реализована функция сортировки данных таблицы по значениям столбцов по модулю для численного значения или по алфавиту (для марок стекла).

Для демонстрации работоспособности разработанной программы были выбраны 6 каталогов стекла из OpticStudio/Zemax [14]: Schott (Германия) – 354 марки стекла; LZOS (Россия) – 54 марки стекла; Ohara (Япония) – 382 марки стекла; CDGM (Китай) – 256 марок стекла; NHG (Китай) – 171 марка стекла. Также был создан суммарный каталог (Sum), образованный путем объединения 5 вышеперечисленных каталогов – 1217 марок стекла.

Пример работы программы приводится для следующих входных данных: спектральные параметры (e , F' , C'), фокусное расстояние $f' = 100$ мм, угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 0^\circ$, диаметр входного

зрачка $D = 20$ мм, $P_0 = W_0 = C_0 = 0$, $\text{Min}(|\Delta v|) = 10$, количество пар для отображения: All (все).

4.1. Пример синтеза склеенного объектива

В данном эксперименте было установлено максимальное значение предварительной оценки $\text{Max_PE} = 0,01$. Из каждого каталога выбраны 2 пары с наименьшим значением предварительной оценки PE. Таким образом, 12 «лучших пар» внесены в табл. 1. Слово «(Zemax)» в составе заголовка обозначает, что данный столбец показывает значения, рассчитанные программой OpticStudio/Zemax.

Табл. 1. Результат синтеза склеенного объектива с помощью разработанной программы и проверка данных в OpticStudio/Zemax (P_2 – параметр сферической аберрации на склеенной поверхности, R_2 – радиус склеенной поверхности, W – кома, S_1 – первая сумма Зейделя, LCA – хроматизм положения, $R_{п.р.}$ – радиус пятна рассеяния)

№	Использованный каталог	Марка 1-го стекла (Каталог)	Марка 2-го стекла (Каталог)	P_2	R_2 [мм]	W	$S_1, \times 10^{-3}$	$S_1, \times 10^{-5}$ (Zemax)	LCA [мкм]	LCA [мкм] (Zemax)	Пред. оценка PE, $\times 10^{-3}$	$R_{п.р.}$ для $2\omega = 0^\circ$ [мкм] (Zemax)
1	Schott	LASF14A	P-SF68	-1,60	-74,52	-0,14	7,4	7,4	12,8	12,9	0,333	16,7
2		LAF13	SF58	-1,68	-63,40	-0,08	6,2	6,2	11,7	11,8	0,453	16,7
3	LZOS	BF7	TF7	-2,69	-50,12	-0,20	13,1	13,1	9,7	9,7	1,340	17,1
4		BF7	TF4	-2,72	-51,96	-0,28	16,4	16,9	11,0	11,3	1,377	16,6
5	Ohara	LAH78	L-BBH2	-1,41	-89,33	-0,28	11,9	11,9	22,2	22,4	0,240	17,1
6		S-LAH79	L-BBH2	-1,09	-73,46	-0,22	11,2	11,2	31,3	31,5	0,256	20,7
7	CDGM	D-ZLAF50	H-ZLAF90	-1,70	-77,97	-0,31	13,7	13,7	15,0	15,0	0,387	12,8
8		H-LAF6LA	H-ZLAF90	-1,93	-76,77	-0,24	10,8	10,8	11,1	11,1	0,423	13,3
9	NHG	H-ZLAF60	H-ZLAF80	-1,46	-74,73	-0,24	11,5	11,5	21,1	21,7	0,341	48,3
10		H-ZLAF56	H-ZLAF80	-1,69	-80,31	-0,42	18,0	18,0	25,3	25,9	0,413	45,5
11	Sum	N-LASF46 (Schott)	L-BBH2 (Ohara)	-1,41	-88,47	-0,24	10,6	10,6	20,5	20,7	0,235	17,4
12		LAH78 (Ohara)	L-BBH2 (Ohara)	-1,41	-89,33	-0,28	11,9	11,9	22,2	22,4	0,240	17,1

По результатам анализа полученных решений можно сделать следующие выводы:

- Значение хроматизма положения LCA, рассчитанное программой, совпадает со значением хроматизма положения, полученным от OpticStudio/Zemax.
- Значение первой суммы Зейделя S_1 , рассчитанное разработанной программой, больше значения первой суммы Зейделя от программы OpticStudio/Zemax в 100 раз. Данное расхождение объясняется тем, что в OpticStudio/Zemax параметры первой суммы Зейделя выдаются с коэффициентом пропорциональности $f' / [(2k)^4]$, где k – диафрагменное число.
- Зависимость между предварительной оценкой и диаметром пятна рассеяния не носит прямой линейный характер. Этот факт означает, что разработанный алгоритм помогает расчетчику определить среди существующих пар материалов некоторые «хорошие» решения для дальнейшего анализа и оптимизации. Более точная оценка рассчитанных объ-

ективов должна осуществляться в какой-либо программе автоматизации проектирования оптических систем, такой как, например, OpticStudio/Zemax, Code V, ОПАЛ, САРО и т.д.

- В каталоге LZOS найдены «лучшие пары» BF7–TF7 и BF7–TF4, здесь из баритового флинта выполняется положительная линза. Данный результат совпадает с выводом в [10].
- Диаметры пятен рассеяния «хороших пар» из каталога NHG оказываются наибольшими по сравнению с другими парами, хотя их предварительные оценки PE слабо отличаются. Причина такого расхождения заключается в том, что комбинации (H-ZLAF60–H-ZLAF80) и (H-ZLAF56–H-ZLAF80) характеризуются большой разностью относительных частных дисперсий материалов: их модули более 0,05, а для других пар в табл. 1 они не превышают 0,02. Таким образом, вторичный спектр в этих парах определяет размеры пятен рассеяния.
- Среди существующих пар при расширении условия $\text{Max_PE} = 100$ появляются «не тонкие па-

ры», т.е. варианты с толщинами линз более $f/10$. Они обладают малыми радиусами кривизны, большими значениями параметров P_i, W_i, C_i на поверхностях и большим значением предварительной оценки PE . Таким образом, от них не стоит ожидать хорошего качества изображения, хотя они могут выступать компенсаторами в более сложных системах.

Для любого рассчитанного варианта системы, который выбирает пользователь, в соседнем окне дается его подробное описание, представленное в табл. 2.

4.2. Пример синтеза расклеенного объектива

В данном эксперименте было установлено максимальное значение предварительной оценки $Max_{PE}=10$. В табл. 3 представлено 12 пар с наименьшими значениями предварительной оценки PE . Все варианты имеют апланатическую коррекцию ($W \ll 10^{-10}$).

Из анализа рассчитанных вариантов расклеенных объективов можно сделать следующие выводы:

- Отличие значений первой суммы Зейделя S_1 , рассчитанных разработанной программой и полученных с применением OpticStudio/Zemax, объясняется используемым в OpticStudio/Zemax коэффициентом пропорциональности $f / [(2k)^4]$, где k – диафрагменное число.

- Величина хроматизма положения LCA совпадает в разработанной программе и в OpticStudio / Zemax.

- Зависимость между предварительной оценкой и диаметром пятна рассеяния не носит прямой линейный характер. Программа помогает расчетчику подобрать некоторые «хорошие» варианты, которые могут быть взяты за основу дальнейшего проектирования оптической системы.

Размеры пятен рассеяния расклеенных объективов существенно меньше, чем дают склеенные объективы.

Табл. 2. Конструктивные параметры рассчитанного варианта (приводятся для варианта 11)

Радиус [мм]	Осевое расстояние [мм]	Материал
68,69	3,3	N-LASF46 (Schott)
- 88,46	2,2	L-BBH2 (Ohara)
1185,85		

Табл. 3. Результат синтеза расклеенного объектива с помощью разработанной программы и проверка данных в OpticStudio Zemax (S_1 – первая сумма Зейделя, LCA – хроматизм положения, $R_{п.р.}$ – радиус пятна рассеяния)

№	Использованный каталог	Марка 1-го стекла (Каталог)	Марка 2-го стекла (Каталог)	$S_1, \times 10^{-2}$	S_1 (Zemax), $\times 10^{-4}$	LCA [мкм]	LCA [мкм] (Zemax)	Предварительная Оценка PE	$R_{п.р.}$ для $2\omega = 0^\circ$ [мкм] (Zemax)
1	Schott	N-LAK34	SF59	5,1	5,1	15,3	15,4	4,62	10,4
2		LAK31	SF59	5,1	5,1	15,2	15,4	4,64	10,8
3	LZOS	LZ OK4	LZ TF10	9,5	9,5	27,5	27,7	6,96	13,9
4		LZ OK4	LZ TF5	9,3	9,3	21,7	21,8	7,29	14,5
5	Ohara	S-YGH52	L-BBH1	3,7	3,7	13,9	14,2	3,53	12,3
6		YGH51	L-BBH1	3,7	3,7	14,1	14,4	3,53	12,4
7	CDGM	H-LAK52	H-ZF88	4,0	4,0	11,2	11,4	3,74	11,8
8		H-LAK53A	H-ZF88	4,1	4,1	11,9	12,1	3,78	11,5
9	NHG	H-LAK52	H-ZF75	4,0	4,0	11,2	11,0	3,75	11,9
10		H-LAK53	H-ZF75	4,1	4,1	12,0	12,2	3,80	11,6
11	Sum	LAK33 (Schott)	L-BBH1 (Ohara)	3,7	3,7	14,1	14,4	3,53	12,4
12		H-LAK53B (CDGM)	L-BBH1 (Ohara)	3,7	3,7	14,1	14,4	3,53	12,4

Для любого рассчитанного варианта системы, который выбирает пользователь, в соседнем окне дается его подробное описание, представленное в табл. 4.

Табл. 4. Конструктивные параметры рассчитанного варианта (приводятся для варианта 11)

Радиус [мм]	Осевое расстояние [мм]	Материал
73,14	3,10	LAK33 (Schott)
- 172,27	0,45	AIR
- 118,42	2,20	L-BBH1 (Ohara)
- 239,18		

Заключение

В данной работе представлен алгоритм для автоматического синтеза склеенного и расклеенного объективов с перебором всех возможных материалов из заданного каталога. Также была предложена система ранжирования рассчитанных объективов по критерию

предварительной оценки PE . Поскольку удачный выбор материалов сильно влияет на коррекционные возможности объективов и данный процесс требует больших затрат времени, разработанная на основе алгоритма программа помогает оптику-расчетчику ускорить и упростить этап синтеза объектива. Рассчитанные системы могут служить начальными вариантами для дальнейшей оптимизации в программах проектирования оптических систем. Программой можно пользоваться не только в случае синтеза отдельных простых склеенных и расклеенных объективов, но и при «модульном проектировании» для синтеза отдельных компонентов составных оптических систем. Тогда абберационные характеристики отдельных компонентов будут заранее известны, таким образом, абберационные свойства сложной системы вполне предсказуемы.

References

- [1] Zapryagaeva LA, Sveshnikova IS. Calculation and design of optical systems: textbook for universities [In Russian]. Moscow: "Logos" Publisher; 2000.
- [2] Oleĭnik SV, Khatsevich TN. Investigation of two-lens achromat objectives as the basic elements of fast objectives of night-vision devices. *J Opt Technol.* 2009; 76: 53-54.
- [3] Mozharov GA. Geometric optics: Textbook [In Russian]. 2nd ed. Saint-Petersburg: "Lan" Publisher; 2019.
- [4] Slyusarev GG. Calculation of optical systems [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1975.
- [5] Andreev LN, Ezhova VV. Two-lens stuck objectives with an aspheric surface of the second order. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 2011; 1(71): 134-135.
- [6] Trubko SV. Calculation of cemented doublet objectives [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher, 1984.
- [7] Ivanova TV, Romanova GE, Zhukova TI, Kalinkina OS. Method for calculation and analysis of a cemented component with achromatic and aplanatic correction. *J Opt Technol* 2017; 84: 548-551.
- [8] Romanova G, Ivanova T, Korotkova N. Automation design of cemented doublet. *Proc SPIE* 2015; 9626: 96262S. DOI: 10.1117/12.2191115.
- [9] Velzel C. A course in lens design. Dordrecht: Springer; 2014.
- [10] Grammatin AP, Romanova GE, Balatsenko ON. Calculation and automation of the design of optical systems [In Russian]. Saint-Petersburg: "NIU ITMO" Publisher; 2013.
- [11] Grammatin AP, Romanova GE, Tsyganok EA. Computer modeling in the study of disciplines related to the calculation of optical systems. Guidelines for laboratory work [In Russian]. Saint-Petersburg: "NIU ITMO" Publisher; 2011.
- [12] Churilovskiy VN. Theory of optical instruments [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1966.
- [13] Berek M. Grundlagen der praktischen Optik: Analyse und Synthese optischer Systeme. Berlin, Leipzig: Walter de Gruyter und Co; 1930.
- [14] Zemax optical design program user's manual. 2014. S 1.
- [15] Apenko MI, Zapryagaeva LA, Sveshnikova IS. Task book on applied optics: Textbook [In Russian]. 2nd ed. Moscow: "Vysshaya Shkola" Publisher; 2003.

Сведения об авторах

Нгуен Зуи Хынг, 1993 года рождения, в 2019 году окончил Университет ИТМО по специальности «Прикладная оптика». Является аспирантом инженерно-исследовательского факультета университета ИТМО. Область научных интересов: расчет оптических систем, программирование, обработка изображения. E-mail: 184365@niuitmo.ru.

Бахолдин Алексей Валентинович, 1976 года рождения, в 1999 году окончил Университет ИТМО по специальности «Оптехника», в 2002 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы», работает в должности профессора инженерно-исследовательского факультета Университета ИТМО. Автор более 130 научных работ. Область научных интересов: расчет и проектирование оптических систем, астрономическая оптика, офтальмологическая оптика, оптика микроскопов. E-mail: bakholdin@itmo.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 15 мая 2021 г. Окончательный вариант – 1 сентября 2021 г.

Automation of synthesis and ranking of cemented and air-spaced doublets

D.H. Nguyen¹, A.V. Bakholdin¹

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The article presents an algorithm for the synthesis of cemented and air-spaced doublets. A description of the doublets design computer tool from materials of a user-defined catalog is presented. Features of doublets design automation are considered. An approach for ranking of the generated variants of the doublets according to the preliminary evaluation criterion determined with the main parameters within the framework of the theory of third-order aberrations is proposed. The developed computer tool will help an optical engineer to calculate quickly cemented and air-spaced doublets with the required characteristics.

Keywords: lens system design, aberrations, doublets.

Citation: Nguyen DH, Bakholdin AB. Automation of synthesis and ranking of cemented and air-spaced doublets. *Computer Optics* 2022; 46(1): 83-89. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-923.

Authors' information

Duy Hung Nguyen, (b.1993) graduated from St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University) in 2019, majoring in Applied Optics. Currently he is a postgraduate student of Engineering Research Faculty at ITMO University. Research interests: optical design, programming, image processing. E-mail: 184365@niuitmo.ru.

Alexey Valentinovich Bakholdin, (b.1976) graduated from ITMO University in 1999 with a degree in Optical design, Ph.D. (2002), works as a professor of Engineering and Research department in the ITMO University. Research interests: optical systems design, astronomical optics, ophthalmic optics, microscope optics. E-mail: bakholdin@itmo.ru.

Received May 15, 2021. The final version – September 1, 2021.
