

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЗ МОДУЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ НАСТОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КЛАВИШНЫХ МАШИН

А. В. БУЦЕВИЦКИЙ, С. А. РОДИОНОВ, Н.И.ХЛУСОВА

При проектировании оптических систем с успехом используются ЭВМ различных типов и классов [1]. В последнее время получили широкое применение настольные персональные ЭВМ «Электроника ДЗ-28». Для этих ЭВМ разработан пакет прикладных программ (ППП) ОПАЛ-ЭКВМ, применение которого позволяет производить анализ параксиальных характеристик оптических систем, а также aberrаций третьего порядка и действительных лучей [2]. В данной статье описаны программы синтеза оптических систем из модулей с известными свойствами, при совместном использовании которых с ППП ОПАЛ-ЭКВМ значительно расширяются его возможности.

Задача автоматизированного синтеза является одной из наиболее сложных и до сих пор далека от решения. Существующие программы [1] позволяют синтезировать конструкции простейших оптических систем, и многие из них основаны на теории aberrаций третьего порядка, что ограничивает возможность их применения для систем с большими полями и апертурами.

В основу описываемого пакета программ положена методика синтеза оптических систем из модулей путем последовательного набора их в процессе расчета хода реальных лучей (апертурного и главного), что обеспечивает удовлетворительную коррекцию aberrаций при любых полях и апертурах, а также позволяет избежать введения в систему «лишних» элементов. Под модулем здесь понимается часть оптической системы, обладающая определенными aberrационными свойствами. При синтезе конструктором заранее определены состав модулей, последовательность их расположения, расстояния между ними, показатели преломления сред, а также значения свободных параметров модулей. Все эти величины конструктор использует для обеспечения требуемых значений параксиальных характеристик, а также для управления теми aberrациями, которые не корректируются автоматически благодаря свойствам используемых элементов. Остальные параметры модулей определяются ЭВМ по точным аналитическим соотношениям, обеспечивающим строгую коррекцию определенных aberrаций апертурного или главного луча.

В программах синтеза могут использоваться модули различной сложности, состоящие из одной, двух, трех и более поверхностей. Единственным параметром простейших модулей является радиус кривизны поверхности r , который определяется автоматически. В эту группу входят следующие модули (в дальнейшем в скобках указаны условные обозначения модулей): поверхность, concentричная изображению, образованному предыдущей частью системы по главному (КП) или апертурному (КПО) лучу, concentричная зрачку по главному (КЗ) или нулевому (КЗО) лучу, апланатическая по главному (АП)

или нулевому (АПО) лучу. Условно сюда же отнесем поверхности с заданным радиусом (ЗР). Перечисленные модули достаточно известны и широко применяются при синтезе оптических систем [3, 4].

Модули из двух поверхностей являются линзами стеклянными или воздушными. У этих модулей четыре параметра: радиусы кривизны поверхностей r_1 и r_2 , расстояния между ними d и показатель преломления линзы n_d . В литературе [3] описаны следующие виды однолинзовых модулей: анастигматическая линза (АН), телеанастигматическая линза (ТА) и линза Смита (ЛС). С помощью этих модулей можно получить оптические системы с удовлетворительными коррекцией астигматизма и кривизной изображения на достаточно больших полях, причем свободные параметры этих модулей успешно используются для коррекции зон астигматизма и кривизны, а также сферической аберрации и комы, однако их применение было весьма ограничено из-за трудностей синтеза. Исследования, проведенные в этой области, позволили получить простые выражения для построения таких модулей, которые можно включить в пакет программ синтеза.

Для построения анастигматических линз конструктор должен задать значения свободных параметров r_1 и n_d , а также так называемого параметра нагрузки $\Psi = \sin(\omega_i - \omega_{i+1})$, где ω_i и ω_{i+1} – углы главного луча с осью до и после последней поверхности модуля. Поскольку в процессе синтеза происходит решение квадратного уравнения, мы получаем два решения, соответствующие линзам первого (АН1) и второго (АН2) типа. Выбор типа линзы производится конструктором. Определение d и r_2 выполняется по формулам из условия коррекции астигматизма в пространстве после модуля.

Для построения телеанастигматической линзы необходимо задать n_d и увеличение Γ , а также род линзы [3]. Радиусы кривизны r_1, r_2 и толщина d определяются автоматически для заданного рода линзы из условия телеанастигматичности.

У линзы Смита вторая поверхность принимается плоской. Показатель преломления n_d задается конструктором, а r_1 и d определяются автоматически из условия устранения кривизны Пецваля как в области аберраций третьего порядка, так и для реального главного луча, где она определяется формулой $Z_t = 3Z_s$.

Кроме описанных несомненный интерес представляют новые типы однолинзовых и многолинзовых модулей, для синтеза которых удалось получить достаточно простые аналитические выражения.

Однолинзовый корректор астигматизма (АНТ) строго исправляет астигматизм предшествующей части системы и обеспечивает телецентрический ход главного луча. Конструктор задает n_d и Ψ , а также тип модуля. Неизвестные конструктивные параметры r_1, r_2 и d определяются автоматически.

Однолинзовый корректор сферической аберрации (КС) строго исправляет сферическую аберрацию апертурного луча предшествующей части системы.

Конструктор задает r_1 и n_n , а также параметр нагрузки $\Psi = \sin(\delta_i - \delta_{i+1})$, где δ_i и δ_{i+1} – углы апертурного луча с осью до и после последней поверхности модуля. Значения r_2 и d определяются автоматически из условия коррекции сферической аберрации.

Однолинзовый телекорректор сферической аберрации (КСТ) кроме устранения сферической аберрации предшествующей части системы обеспечивает также телескопичность апертурного луча. Для построения модуля необходимо задать n_n и Ψ , остальные параметры (r_1, r_2 и d) определяются автоматически.

Корректор сферической аберрации и неизопланатизма (КСН) состоит из трех поверхностей и обеспечивает строгое исправление указанных аберраций предшествующей части системы, а также получение требуемого значения увеличения или телескопичности апертурного луча. Для построения модуля необходимо задать значения радиуса первой поверхности r_1 , показателей преломления n_2 и n_3 , а также параметра нагрузки Ψ . Параметры r_2, r_3, d_1 и d_2 определяются автоматически в процессе синтеза. Этот модуль может использоваться как самостоятельная система в виде двухлинзового склеенного объектива или как часть более сложной системы.

Трехлинзовый афокальный компенсатор с увеличением 1 (АФК) состоит из шести поверхностей и свободен от сферической аберрации и комы для апертурного луча. Этот компенсатор должен помещаться в параллельном пучке. Для построения модуля необходимо задать показатели преломления, радиус кривизны первой поверхности r_1 , первое и третье осевые расстояния d_1, d_3 и параметр нагрузки Ψ . Остальные параметры находятся автоматически в процессе синтеза. Этот модуль может быть использован для коррекции зон сферической аберрации или для исправления аберраций главного луча.

При синтезе некоторых модулей в качестве свободного параметра использовался параметр нагрузки Ψ . Он представляет собой синус разности углов реального луча с осью до и после одной из поверхностей модуля, поэтому не может по абсолютной величине превышать единицу, а также не должен равняться 0. При подборе величины данного параметра необходимо добиваться его минимальных значений по абсолютной величине, так как в этом случае будут уменьшаться аберрации высшего порядка. Практические исследования показали, что шаг изменения данного параметра в процессе подбора не должен превышать 0,01, а его реальные значения лежат в интервале от $-0,3$ до $+0,3$.

Синтез оптических систем из описанных модулей осуществляется при помощи двух программ, одна из которых набирает оптическую систему по апертурному лучу осевого пучка, а вторая – по главному лучу, идущему от заданной конструктором точки предмета. Набор системы осуществляется путем последовательного расчета хода реального луча (апертурного или главного в зависимости от выбранной конструктором программы синтеза), проходящего через каждую поверхность системы. При встрече поверхности, принадлежащей

модулю, конструктивные параметры которого установлены программой, используемой конструктором, происходит их определение, после чего полученные данные вносят в соответствующие регистры памяти в зависимости от их расположения в оптической системе, затем набор продолжается. Если в процессе набора встретился модуль, конструктивные параметры которого определяются при использовании другой программы, то в этом случае эти параметры считаются заданными. Таким образом, чередуя обращения к этим программам в процессе набора, можно синтезировать оптические системы, содержащие модули, конструктивные параметры которых определяются при использовании различных программ. По окончании работы исходные данные новой конструкции готовы для использования любых процедур, предусмотренных основной частью ППП ОПАЛ-ЭКВМ [2].

Методика автоматизированного синтеза оптических систем с помощью описанных программ позволяет значительно сократить количество свободных параметров при проектировании оптических систем и гарантирует получение конструкции с устраненными аберрациями реальных лучей – главного и апертурного.

Примером синтеза может служить объектив, набранный по схеме «Планар». Исследования показали [3], что объективы данного типа можно набрать по схеме: КЗ-АП-АН2-АН1-АП-КЗ в наших обозначениях. В общем случае имеется 16 свободных параметров (без учета стекол), к которым можно отнести все радиусы кривизны поверхностей, осевые расстояния и воздушные промежутки, а также положение входного зрачка. Необходимо устранить пять монохроматических аберраций, и выдержать требуемое значение фокусного расстояния системы. При синтезе объектива по предложенной формуле количество свободных параметров автоматически сокращается до 10. Если из их числа исключить d_2, d_6 и S_p , а параметр нагрузки использовать, например, только для получения конструктивных значений осевых расстояний анастигматических линз, то число свободных параметров сокращается до пяти. Вторым преимуществом предложенной схемы является отсутствие астигматизма для любых значений свободных параметров. Благодаря тому, что в процессе синтеза сохраняется некоторая симметричность системы относительно диафрагмы, имеется возможность получить систему с исправленной дисторсией. Фокусное расстояние можно получить, например, масштабированием полученной конструкции. Таким образом, в процессе автоматизированного синтеза остается осуществлять контроль только сферической аберрации, неизопланатизма и кривизны изображения. На основе этого метода был создан объектив с фокусным расстоянием 100 мм, относительным отверстием 1:2,5 и углом поля зрения $2\omega = 40^\circ$, конструкция и графики аберраций которого приведены на рис. 1.

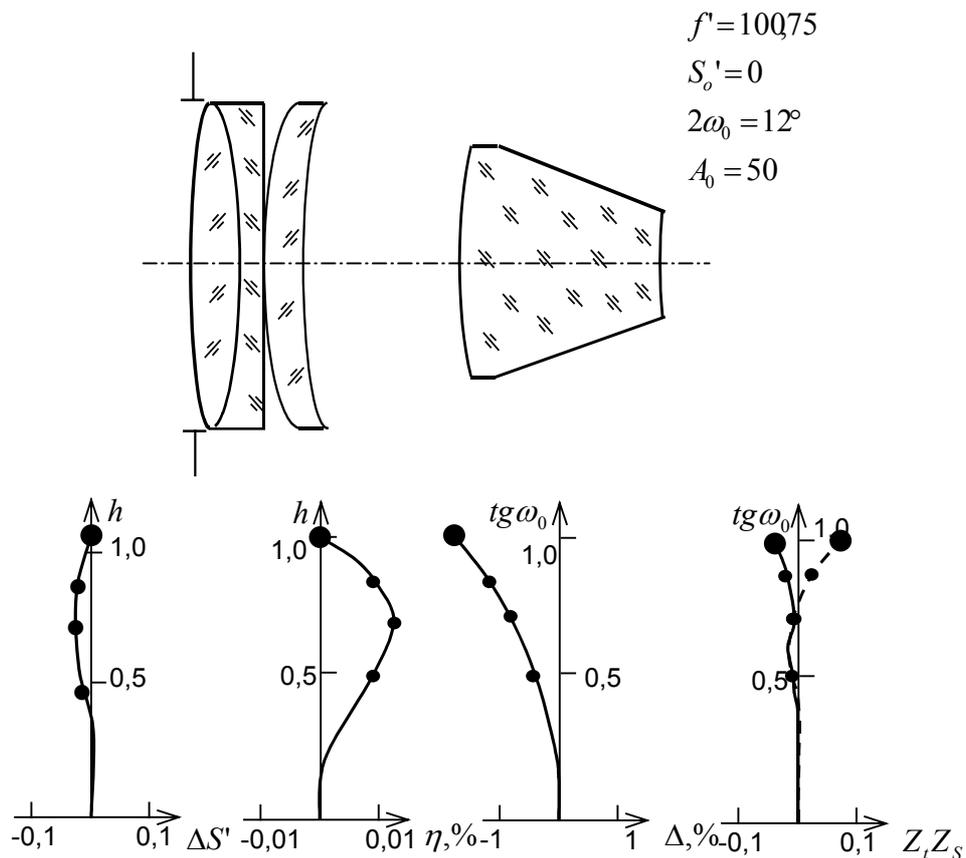


Рис.1

Примером синтеза особосветосильного объектива может служить конструкция, набранная по схеме КСН-АП-КПО-ЗР [5]. В общем случае рассматриваемая система имеет 13 свободных параметров, включающих в себя семь радиусов кривизны поверхностей и шесть толщин и воздушных промежутков. Как и в предыдущем случае, устранению подлежит пять монохроматических aberrаций. При наборе объектива по приведенной формуле радиус кривизны первой поверхности и параметр нагрузки первого модуля служат для получения приемлемых осевых расстояний образующих его линз при известном $\alpha' = A_0 / f' \cdot n_2 n_3$, где f' – требуемое фокусное расстояние всего объектива, A_0 – передняя апертура, n_2 и n_3 – показатели преломления второй и третьей линз объектива соответственно. Положение второго компонента относительно первого и его осевое расстояние выбираются, исходя из конструктивных соображений, и не влияют ни на коррекцию aberrаций апертурного луча, ни на параксиальные характеристики получаемой конструкции. Осевое расстояние между четвертым и пятым модулями выбирается из условия нахождения последнего радиуса кривизны в плоскости изображения объектива. Таким образом, к свободным параметрам можно отнести осевое расстояние между вторым и третьим компонентами и радиус кривизны последней поверхности, которые влияют только на aberrации главного луча. Тем самым нам удалось разделить влияние модулей на различные типы aberrаций. Мы создали объектив с фокусным расстоянием 100 мм, относительным отверстием 1:1, полем зрения $2\omega = 12^\circ$ и вынесенным

вперед зрачком, конструкция и графики aberrаций которого приведены на рис. 2.

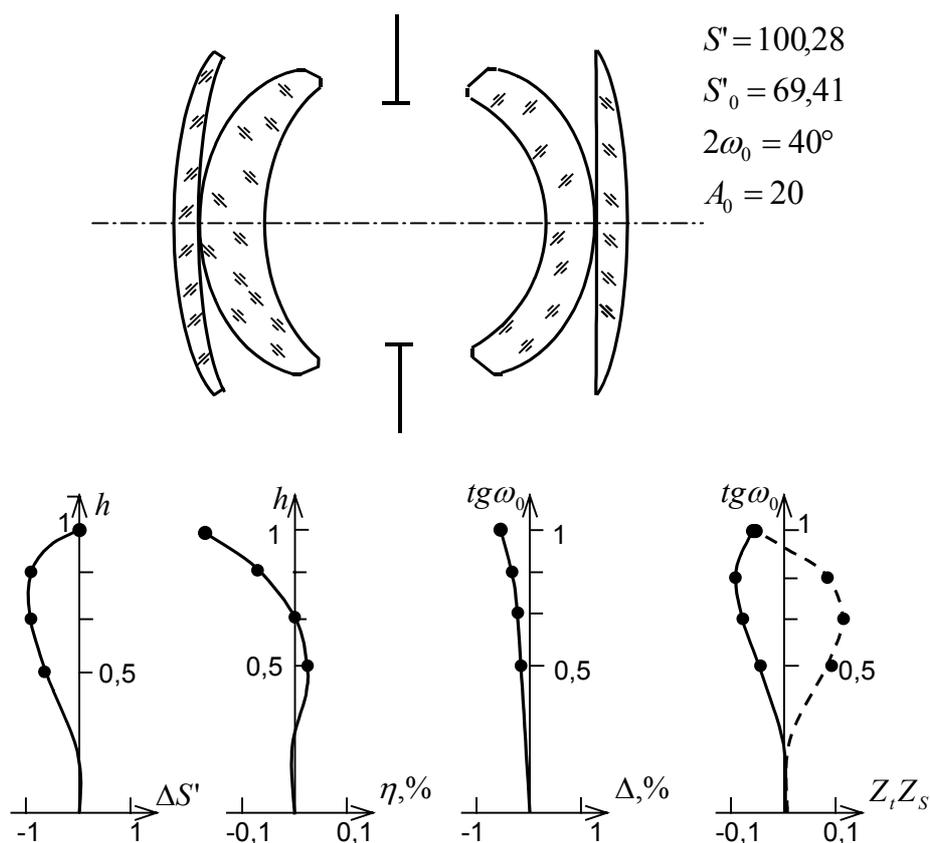


Рис.2

Опытная эксплуатация описанного пакета программ показала высокую эффективность их использования при проектировании новых конструкций оптических систем. Разработчики предполагают в дальнейшем расширить набор модулей, а также развивать используемую методику синтеза и разработать рекомендации по ее практическому применению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вычислительная оптика. Справочник (М. М. Русинов, А. П. Грамматин, П. Д. Иванов и др.)/ Под общей редакцией М. М. Русинова Л.: Машиностроение, 1984. 423с.
2. Родионов С. А., Хлусова И. И. – ОМП, 1980, № 10, с. 37.
3. Русинов М. М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.
4. Грамматин А. П. – Тр. ГОИ, 1981, т. 49, вып. 183, с. 23.
5. Русинов М. М., Анитропова И. Л. А. с. № 634222. – Бюл. изобр., 1978, № 43.