

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАНКРАТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© 2013 Нгуен Ван Луен, аспирант

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: ngvluyen@yahoo.com

Изложены теоретические основы построения и вычисления параметров панкратической телескопической системы, разработаны математическая модель, алгоритм и программа автоматизированного проектирования системы; приведено описание блок-схемы программы.

Ключевые слова: телескопическая система, переменное увеличение, оборачивающая система, алгоритм, программа.

Коды OCIS: 240.0240, 080.1753.

Поступила в редакцию 11.07.2013.

Разработка оптических систем переменного увеличения представляет собой многоэтапный процесс, причем каждый этап разработки требует выполнения большого объема вычислений. Наиболее трудоемким является этап параметрического синтеза на основе абберационного анализа и оптимизации параметров компонентов системы по критерию качества изображения. Поэтому разработка метода, алгоритма и программного обеспечения процесса выполнения проектирования оптических систем переменного увеличения является актуальной задачей.

В основе решения этой задачи лежит теория проектирования оптических систем и, в частности, теория телескопических систем переменного увеличения. Телескопические (афокальные) системы весьма разнообразны по конструкции и находят широкое применение и как самостоятельные системы, и в качестве составляющих многих оптических приборов и устройств. В данной публикации представлены результаты разработки метода автоматизированного проектирования панкратических телескопических систем с двухкомпонентной оборачивающей системой переменного увеличения.

Как известно, телескопическая система состоит из объектива, оборачивающей системы и окуляра. Для уменьшения диаметра компо-

нентов оборачивающей системы применяют коллективную линзу, которую располагают в задней фокальной плоскости объектива. Оптическую систему панкратической телескопической системы можно построить на основе применения объектива или окуляра переменного фокусного расстояния, а также коллектива или оборачивающей системы переменного увеличения. В рассматриваемом случае изменение видимого (углового) увеличения изображения осуществляется путем продольного перемещения компонентов оборачивающей системы при неизменном расстоянии между плоскостями предмета и изображения.

Оптическая сила двухкомпонентной оптической системы переменного увеличения определяется как

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d, \quad (1)$$

где φ_1 и φ_2 – оптическая сила первого и второго компонентов соответственно, d – расстояние между компонентами. Пусть расстояние между плоскостями предмета и изображения, сформированного оборачивающей системой, равно L . Тогда при поперечном увеличении изображения, равном V , расстояние между компонентами определяется уравнением

$$d = (1/4)L \pm \sqrt{(1/4)L^2 - ((\phi_1 + \phi_2)/\phi_1\phi_2)L - (1/\phi_1\phi_2)((1-V)^2/V)}. \quad (2)$$

Это уравнение удобно представить в виде

$$\tilde{d} = (1/4)\tilde{L} \pm \sqrt{(1/4)\tilde{L}^2 - ((1+k)/k)\tilde{L} - ((1-V)^2/kV)}, \quad (3)$$

где $\phi_2 = k\phi_1$, $\tilde{d} = \phi_1 d$, $\tilde{L} = \phi_1 L$. Выражение (3) определяет действительные значения расстояния \tilde{d} при соблюдении условия

$$\tilde{L} - 4((1+k)/k)\tilde{L} - 4((1-V)^2/kV) - q = 0, \quad (4)$$

где $q \geq 0$. При $\tilde{L} = 0$ условие (4) принимает вид $q \geq -4(1-V)^2/kV$. В этом случае при $k > 0$ поперечное увеличение изображения $V < 0$, а при $k < 0$ увеличение $V > 0$. Решая уравнение (4), получаем

$$\tilde{L} = \frac{2((1+k)/k) \pm 2\sqrt{((1+k)^2/k^2) + (1-V)^2/kV + 1/4q}}{+ (1-V)^2/kV + 1/4q}. \quad (5)$$

В общем случае решение задачи построения двухкомпонентной оптической системы переменного увеличения принципиально возможно, если подкоренное выражение в формуле (5) равно нулю. При этом $q = -4(1+k)^2/k^2 - 4(1-V)^2/kV$. Поперечное увеличение изображения изменяется в интервале $|V_1| \leq |V| \leq |V_2|$, причем кратность изменения поперечного увеличения $m = V_2/V_1$. Вычислив $q_1 = q(V_1)$ и $q_2 = q(V_2)$, выбираем наибольшее значение величины q . Подставив это значение q и соответствующее ему значение V в выражение (5), при выбранном значении коэффициента k определяем требуемое расстояние \tilde{L} .

Расстояние от первого компонента до осевой точки предмета определяется уравнением [1]

$$\tilde{s}_1 = (A+B)/2\tilde{\phi}, \quad (6)$$

где $\tilde{s}_1 = \phi_1 s_1$, $\tilde{\phi} = 1 + k(1 - \tilde{d})$, $A = 2k\tilde{d} - \psi$, $B = \sqrt{(\psi - 4)\psi}$, $\psi = \tilde{L} + k(1 - \tilde{d})\tilde{L} + k\tilde{d}^2$. Полученные выражения (3) и (6) представляют собой уравнения перемещения компонентов ϕ_1 и ϕ_2 при изменении поперечного увеличения изображения, сформированного двухкомпонентной оптической системой.

Наиболее широко применяются телескопические системы, в которых выходной зрачок и окулярное угловое поле остаются неизменными при всех значениях увеличения. Двойной

знак перед квадратным корнем в уравнении (5) свидетельствует о том, что существуют две пары оптически сопряженных точек, расстояние между которыми в обоих случаях равно одной и той же величине \tilde{L} . При этом, согласно уравнению (6), $\tilde{s}_{11} = (A+B)/2\tilde{\phi}$, а $\tilde{s}_{12} = (A-B)/2\tilde{\phi}$. Поэтому возникает вполне естественная мысль о размещении в одной из пар оптически сопряженных точек – осевых точек предмета и изображения, а в другой – центров входного и выходного зрачков системы. При этом расстояние между центром входного зрачка и осевой точкой предмета будет равно $p = \tilde{s}_{11} - \tilde{s}_{12} = B/\tilde{\phi}$. Однако поскольку $B = B(\tilde{d})$, то и расстояние p будет переменным, т.е. теоретически смысл сохранения постоянным расстояния между оптически сопряженными точками во второй паре, строго говоря, утрачивается. И тем не менее сам факт существования такой пары точек предполагает возможность компромиссного выбора положения входного зрачка.

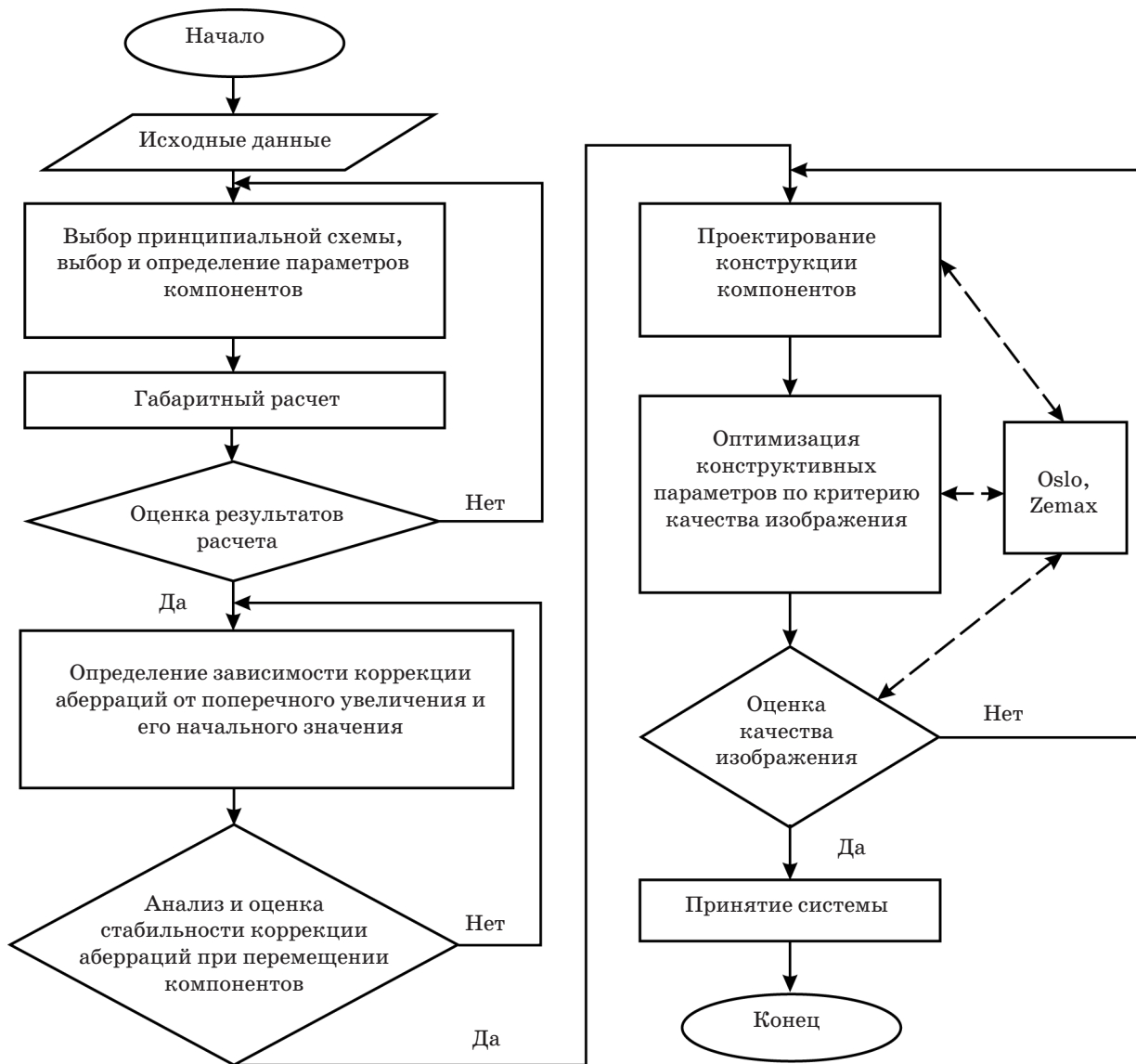
В общем случае угловое увеличение изображения, сформированного сложной телескопической системой, определяется формулой [2–5]

$$\Gamma = -(f'_{об}/f'_{ок})V, \quad (7)$$

где V – поперечное увеличение изображения, сформированного оптической системой, расположенной между объективом и окуляром (в рассматриваемом случае оборачивающей системой переменного увеличения); $f'_{об}$ и $f'_{ок}$ – фокусное расстояние объектива и окуляра соответственно.

При разработке оптики телескопической системы переменного увеличения заданными величинами являются диапазон изменения увеличения (или кратность изменения увеличения и одно из предельных его значений), расстояние от объектива до окуляра, удаление выходного зрачка и др. В том случае, когда предельные значения поперечного увеличения изображения, сформированного оборачивающей системой, взаимосвязаны соотношением $\Gamma_{max} = 1/\Gamma_{min}$, закон перемещения компонентов симметричен относительно их среднего положения. При этом достигаются минимальные габариты системы. Однако такой диапазон изменения углового увеличения может оказаться неоптимальным для обеспечения стабильности состояния коррекции аберраций.

Сферическая аберрация и кома изображения определяются соответственно коэффициентами S_1 и S_{II} , функционально связанными с параметрами P и W , значения которых определяются



Блок-схема программы автоматизированного проектирования панкратической телескопической системы.

конструктивными параметрами оптической системы. Эти параметры профессор Г.Г. Слюсарев назвал основными [6], если предмет расположен на бесконечном большом расстоянии от оптической системы. Обозначим их через \mathbf{P}^* и \mathbf{W}^* . Параметры P и W связаны с параметрами \mathbf{P}^* и \mathbf{W}^* уравнениями вида:

$$P = (\alpha' - \alpha)^3 \mathbf{P}^* + 4\alpha(\alpha' - \alpha)^2 \mathbf{W}^* + \alpha(\alpha' - \alpha)[2\alpha(2 + \pi) - \alpha], \quad (8)$$

$$W = (\alpha' - \alpha)^2 \mathbf{W}^* + \alpha(\alpha' - \alpha)(2 + \pi). \quad (9)$$

Если принять $\alpha' = 1$, то $\alpha = V$ и, соответственно, если принять $\alpha = 1$, то $\alpha' = 1/V$. При этом в рассматриваемом случае оборачивающей си-

стемы из двух тонких компонентов имеем: $\alpha'_1 - \alpha = h_1 \varphi_1$, $\alpha - \alpha_2 = h_2 \varphi_2$, $h_2 = h_1 - \alpha_2 d$, $\alpha_2 = \alpha'_1$. Подставив ряд значений V_1 и V_2 при $V_1 V_2 = V$ в уравнения (8) и (9) и решив их при $S_1 = \text{const}$, находим значения основных параметров \mathbf{P}^* и \mathbf{W}^* , а следовательно, и зависимость остаточных aberrаций (сферической и комы) от поперечного увеличения $-\delta g' = \delta g'(V)$. Повторив описанные вычисления для других интервалов значений поперечного увеличения при той же кратности изменения и сравнив остаточные aberrации, выбираем для последующего расчета интервал, в пределах которого остаточные aberrации имеют наименьшие значения. Полученные значения параметров P_i и W_i , апертурных углов и линейных величин изображаемого

предмета и изображения служат основанием для оценки сложности оптической системы каждого компонента.

Изложенные соображения легли в основу разработки алгоритма и программы автоматизированного проектирования панкратической телескопической системы. Блок-схема программы представлена на рисунке. Наиболее рациональной панкратической телескопической системой считают систему, в которой выходной зрачок и окулярное угловое поле наблюдаемого изображения остаются неизменными при всех значениях увеличения. При этом угловое поле наблюдаемого предмета изменяется обратно пропорционально изменению увеличения изображения, а диаметр входного зрачка – пропорционально увеличению. Исходными данными для проектирования оптической системы телескопа являются диапазон или кратность изменения увеличения, его максимальное (или минимальное) значение, максимальное (или минимальное) угловое поле в пространстве предметов, положение и диаметр выходного зрачка, требования к качеству изображения.

Процесс проектирования телескопической панкратической системы начинается с выбора принципиальной схемы, выбора и определения параметров отдельных компонентов системы, т.е. с того, что называется габаритным расчетом системы. Определив габаритные параметры компонентов системы, необходимо оценить их изменение при изменении увеличения в заданном диапазоне, а также закон перемещения компонентов оборачивающей системы. Описанный процесс проектирования выполняется в интерактивном режиме.

Полученные в результате выбора и расчета параметры системы служат исходными данны-

ми для компьютерного решения системы линейных уравнений, определяющих коррекцию первичных aberrаций широкого пучка лучей. Это решение сопровождается автоматизированной оптимизацией определения узловых значений поперечного увеличения по критерию равенства экстремальных отклонений остаточных aberrаций относительно среднего значения.

Вычисленные значения основных параметров P^* и W^* компонентов служат основанием для выбора конструкции их оптических систем. В результате aberrационного параметрического синтеза получаем конструктивные параметры компонентов, а следовательно, конструктивные параметры панкратической телескопической системы в целом. В результате автоматической оптимизации конструктивных параметров полученной таким образом системы по критерию качества изображения получаем ее в окончательном виде. Для выполнения этапа оптимизации параметров системы разработан блок обмена данными между разработанной программой автоматизированного проектирования и профессиональными программами проектирования (Zemax, Oslo). Кроме того, разработанная программа может экспортировать вычисленные данные оптической системы в программы AutoCAD, SolidWorks для моделирования и построения чертежей.

Важное значение для решения сложной и трудоемкой задачи проектирования оптических систем переменного увеличения имеет создание эффективного программного обеспечения. В результате изложенного можно сделать вывод, что задача автоматизации проектирования панкратической телескопической системы с оборачивающей системой переменного увеличения успешно решена.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Журова С.А., Зверев В.А.* Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 10. С. 68–86.
2. *Михайловская Л.И.* Панкратическая зрительная труба. М.: Изд. МГТУ, 1993. 31 с.
3. *Запрягаева Л.А., Свешникова И.С.* Расчет и проектирование оптических систем. М.: “Логос”, 2000. 582 с.
4. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И.* Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 447 с.
5. *Апенко М.И., Дубовик А.С.* Прикладная оптика. М.: Наука, 1982. 351 с.
6. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.