

СИНТЕЗ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В ПАРАКСИАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

М. Г. Шнякин

На основе изучения и использования свойств одиночного подвижного компонента показана возможность единого подхода к определению параксиальных элементов различных схем двух- и трех-компонентных объективов и афокальных систем переменного увеличения. Приведены формулы для определения параксиальных элементов этих систем.

Схемы на основе одного перемещающегося
компонента

Внедрение ЭВМ в практику разработки оптических систем способствовало развитию одного из наиболее сложных их классов, каким являются панкратические объективы. К настоящему времени разработано

большое число весьма различных по своим оптическим и кинематическим схемам объективов с высокими оптическими и эксплуатационными параметрами. Изучение и анализ наиболее известных и лучших схем объективов [1] показывает, что, несмотря на внешние различия, имеется возможность найти общий логический подход к построению схем этих весьма различных объективов, синтезируя их из простейших элементов, каким является одиночный подвижный компонент.

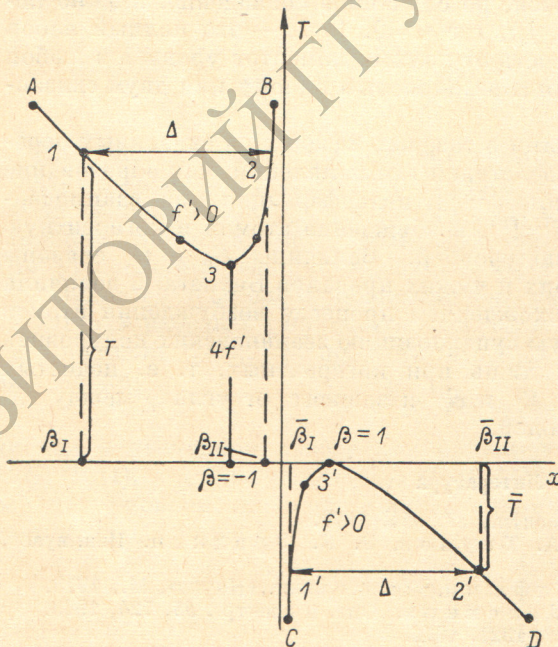


Рис. 1.

Известно [2, 3] выражение, связывающее расстояние T между предметом и изображением с фокусным расстоянием компонента и его увеличением β

$$T = -f' \frac{(1 - \beta)^2}{\beta}. \quad (1)$$

Как следует из (1), одна и та же величина T может быть получена при двух значениях β , причем $\beta_I \beta_{II} = 1$.

На рис. 1 изображен график функции $T(x)$ для $f' > 0$. Переход от β_I к β_{II} соответствует перемещению компонента на величину Δ . При этом для заданной кратности изменения увеличений сдвиг плоскости изображения в промежуточных точках получается минимальным. Так как график $T(x)$ имеет две ветви: AB , проходящую через точку Z , соответствующую $\beta = -1$, и CD , проходящую через точку Z' , где $\beta = 1$, то при одном и том же перемещении компонента Δ увеличение его изменяется в двух интервалах от β_I до $\beta_{II} = 1/\beta_I$ и от β_I до $1/\beta_I$. Так как $x = -f/\beta$ и $\Delta = x_1 - x_2 = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$, то имеем

$$\beta_I - \frac{1}{\beta_I} = \beta_I - \frac{1}{\beta_I}.$$

Из последнего соотношения следуют два равенства: $\beta_I = \beta_I$, не представляющее практического интереса, и $\beta_I = -1/\beta_I$. Из последнего равенства можно сделать вывод, что при перемещении компонента на величину Δ в одной паре сопряженных плоскостей, расположенных на расстоянии T , линейное увеличение изменяется от β_I до $1/\beta_I$, во второй паре плоскостей, расположенных на расстоянии \bar{T} , от $-1/\beta_I$ до $-\beta_I$. Из (4) нетрудно убедиться, что $T + \bar{T} = 4f'$.

Примем за начальное для перемещающегося компонента его левое положение, тогда $x'_I = \Delta + x'_{II}$ или $f'(\beta_{II} - \beta_I) = \Delta$, и так как $\beta_I \cdot \beta_{II} = 1$, получим для оптической силы компонента

$$\varphi = \frac{1 - \beta_I^2}{\beta_I} \frac{1}{\Delta}, \quad (2)$$

при нормировке $\Delta = 1$ имеем

$$\varphi = \frac{1 - \beta_I^2}{\beta_I}. \quad (3)$$

Синтез простейших панкратических систем

Известно [4], что в параксиальной области любой панкратический объектив с неподвижным последним компонентом может быть представлен в виде комбинации телескопической насадки переменного углового увеличения Γ и объектива с постоянным фокусным расстоянием f'_{00} . При этом фокусное расстояние системы f' определяется по формуле

$$f' = \Gamma f'_{00}.$$

Воспользуемся этим свойством для удобства изложения и в дальнейшем вместо панкратического объектива будем рассматривать его переменную часть — телескопическую насадку переменного углового увеличения.

Трехкомпонентные афокальные насадки

На основе перемещающегося компонента могут быть построены трехкомпонентные афокальные насадки переменного увеличения, строго телескопические для крайних значений увеличений. Для этого достаточно при первом крайнем положении (рис. 2) перемещающегося приставить к нему дополнительный (первый) компонент, причем его задний фокус F'_1 должен совпадать с предметной точкой перемещающегося компонента, т. е. $f'_1 = (s_2)_I$, а при втором крайнем положении к нему приставляется третий компонент, причем его передний фокус F_3 совмещается с плоскостью изображения перемещающегося компонента при β_{II} , т. е. $f_3 = (s'_2)_{II}$.

Если принять длину насадки равной единице, что соответствует нормировке $\Delta = 1$, то из (2), а также равенства $f'_1 = (s_2)_I$, $f_3 = (s'_2)_{II}$ и $\beta_I \beta_{II} = 1$

Номер варианта	Знак и величина β_I	Знак оптических сил компонентов; их значения при $M = 16$			Знак Γ	Тип системы	Область применения
1	$-\frac{1}{\sqrt{M}};$ $\beta_I < 0;$ $ \beta_I < 1$	0.75	-3.75	0.75	$\Gamma > 0;$ $\Gamma = \frac{1}{4} \div 4$	Трубка Галилея; насадка Грамацкого	Исходная схема для построения большинства трех- и четырехкомпонентных систем
2	$\sqrt{M}; \beta_I > 0;$ $ \beta_I > 1$	5	-3.75	5	$\Gamma < 0;$ $\Gamma = -4 \div -\frac{1}{4}$	Трубка Кеплера	—
3	$-\sqrt{M}; \beta_I < 0;$ $ \beta_I > 1$	-3	3.75	-3	$\Gamma > 0;$ $\Gamma = 4 \div \frac{1}{4}$	Трубка Галилея	Исходная схема для широкоугольных объективов малой кратности $M = 2 \div 3^*$
4	$\frac{1}{\sqrt{M}}; \beta_I > 0;$ $ \beta_I < 1$	1.25	3.75	1.25	$\Gamma < 0;$ $\Gamma = -\frac{1}{4} \div -4$	Трубка Кеплера	—

получим для определения оптических сил трехкомпонентной насадки следующие формулы:

$$\varphi_1 = \varphi_3 = 1 + \beta_I, \quad \varphi_2 = \frac{1 - \beta_I^2}{\beta_I}. \quad (4)$$

Для углового увеличения справедлива [1] формула

$$\Gamma = -\frac{f_1 \beta_2}{f_3} = -\beta_2,$$

откуда следует $\Gamma_I \Gamma_{II} = 1$ — так называемое условие симметричности увеличения телескопических панкратических систем. Если обозначить через M кратность изменения увеличений в системе, причем $M = \beta_{\max} / \beta_{\min} > 1$, то при заданном M возможны 4 варианта построения телескопических систем (см. таблицу), соответствующих $\beta_I = -1/\sqrt{M}; 1/\sqrt{M}; \sqrt{M}; -\sqrt{M}$.

Наибольшее практическое значение имеет первый из вариантов благо-

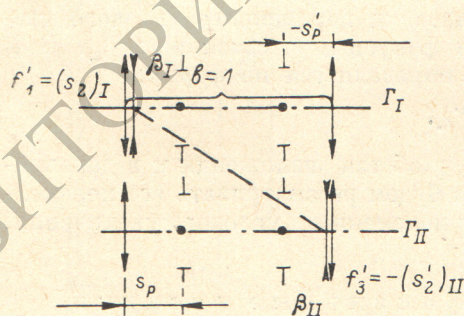


Рис. 2. Схема трехкомпонентной афокальной насадки.

даря малым оптическим силам отдельных компонентов. Именно различные модификации этой насадки с перемещающимся отрицательным компонентом и положительными наружными положены в основу большинства схем современных панкратических объективов. Подвижный компонент в этой насадке перемещается относительно своего положения при $\beta_2 = -1$.

Как было установлено выше, для движущегося компонента имеется вторая пара сопряженных плоскостей, расстояние между которыми сохраняется постоянным при крайних положениях перемещающегося компонента. При расположении в этих плоскостях входного и выходного лучей системы мы получаем их неподвижными для крайних увеличений системы.

Для варианта 1 (см. таблицу) $\beta_I = -1/\sqrt{M}$ и $\beta_{II} = \sqrt{M}$. Нетрудно показать, что в этом случае неподвижные плоскости входного и выходного зрачков системы расположены на расстояниях (рис. 2).

$$s_p = \frac{\sqrt{M}}{M+1}, \quad s'_p = -\frac{\sqrt{M}}{M+1}$$

соответственно относительно первого и третьего компонентов системы. Они утоплены внутрь насадки относительно внешних ее компонентов; величина «утопления» зависит только от кратности системы. Поскольку оба зрачка мнимые, апертурная ирисовая диафрагма не может быть совмещена с их плоскостями, поэтому эти положения зрачков не используются при абберационном расчете панкратических объективов. Но в тех случаях, когда насадка является элементом более сложной, например телескопической системы, указанное расположение зрачков ее может быть полезным, так как при этом существенно упрощается сопряжение зрачков с остальными элементами схемы.

В заключение для варианта 1 насадки ($\beta_I = -1/\sqrt{M}$) приведем формулы, определяющие ее параксиальные элементы через кратность изменения увеличений системы

$$\varphi_1 = \varphi_3 = \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}}, \quad \varphi_2 = \frac{1-M}{\sqrt{M}}, \quad d_2 = 1 - d_1, \quad (5)$$

и d_1 изменяется в пределах от 0 до 1.

Двухкомпонентный панкратический объектив

Положительный компонент, перемещающийся относительно своего положения при $\beta = -1$ (ветвь AB на рис. 1), дает возможность построить двухкомпонентный вариообъектив с неподвижным положением плоскости изображения для двух крайних фокусных расстояний. В этом случае $\beta_I = \sqrt{M}$ (вариант 3 в таблице) и достаточно к перемещающемуся компоненту приставить дополнительный компонент только спереди.

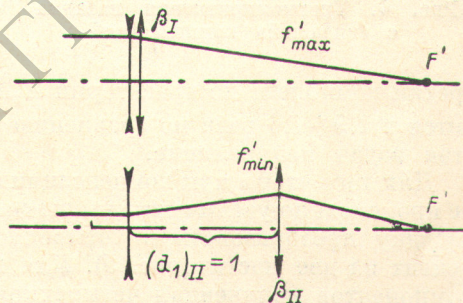


Рис. 3. Схема двухкомпонентного объектива.

Для параксиальных элементов такого двухкомпонентного объектива имеем

$$\varphi_1 = 1 - \sqrt{M}, \quad \varphi_2 = \frac{M-1}{\sqrt{M}}, \quad d = 0 \div 1,$$

для фокусного расстояния всего объектива

$$f' = f'_1 \beta_2 = \frac{\beta_2}{1 - \sqrt{M}}$$

при интервале изменения β_2 от $-\sqrt{M}$ до $-1/\sqrt{M}$.

Из рассмотренных выше (см. таблицу) четырех вариантов построения панкратических систем это единственный вариант, обеспечивающий получение в двухкомпонентном объективе действительного положения плоскости изображения, неподвижной для двух крайних увеличений системы. На рис. 3 схематически показано положение компонентов в таком объективе при большом и малом (широкоугольном) фокусном расстоянии.

В последнее время на основе такой двухкомпонентной схемы были созданы весьма широкоугольные ($2\beta \approx 84^\circ$) панкратические объективы малой ($M = 1.5 \div 2$) кратности: «Канон», «Гексанон», «Пентакс».

Модификация трехкомпонентной насадки

Из рис. 1 (ветвь AB) следует, что при фиксированном положении предмета для промежуточных увеличений его изображение смещается относительно своего положения при крайних увеличениях, причем максимальной величины ΔT_{\max} смещение изображения достигает при ($\beta = -1$). Принимая во внимание, что для рассматриваемого варианта системы $\beta_1 = -1/\sqrt{M}$, $\varphi_2 = (1 - M)/\sqrt{M}$, из (1) получим

$$\Delta T_{\max} = T_{\beta=1} - T_{\beta=-1/\sqrt{M}} = \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M} + 1}. \quad (6)$$

При больших кратностях $M = 10 \div 15$ имеем величину $\Delta T \approx 0.5 \div 0.6$. Таким образом, если для сохранения афокальности системы перемещать

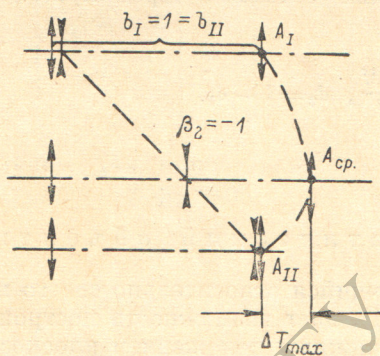


Рис. 4. Трехкомпонентная насадка с «внешней» компенсацией.

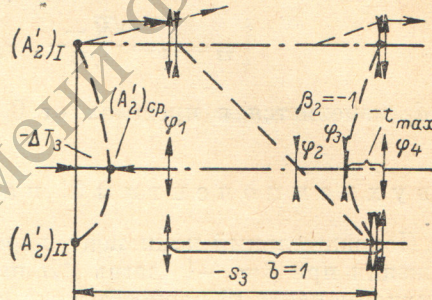


Рис. 5. Схема четырехкомпонентной насадки с «внутренней» компенсацией.

третий компонент по траектории $A_I A_{ср} A_{II}$ (рис. 4), длина системы увеличится в $1.5 \div 1.6$ раза по сравнению с первоначальной, что для большинства задач неприемлемо.

Для того чтобы при компенсации сдвига плоскости изображений (СПИ) не происходило увеличения длины системы, необходимо трехкомпонентную насадку преобразовать в четырехкомпонентную, разделив третий компонент на две части (рис. 5). Для того чтобы при крайних положениях компонентов полученная четырехкомпонентная насадка была полностью эквивалентна исходной трехкомпонентной, примем

$$\varphi_3 + \varphi_4 = \varphi_1, \quad (7)$$

так как в исходной системе оптические силы внешних первого и третьего компонентов равны, при этом возьмем в крайних положениях расстояние между третьим и четвертым компонентами $d_3 = 0$. Первую часть расщепленного компонента будем использовать для компенсации СПИ, а вторую его часть (четвертый компонент) по-прежнему для обеспечения афокальности системы. Перемещение вновь образованного третьего компонента от своих крайних положений должно осуществляться в сторону пространства предметов, тогда длина образованной четырехкомпонентной насадки с внутренней механической компенсацией не будет увеличиваться при промежуточных увеличениях. Задача заключается в том, чтобы найти область значений φ_3 , обеспечивающих в системе именно внутреннюю механическую компенсацию.

Необходимо рассмотреть два случая с положительным и отрицательным компенсирующим компонентом.

1. $\varphi_3 > 0$. После третьего компонента плоскость изображения должна быть неподвижной, тогда из рис. 5 следует, что при движении третьего компонента от одного из крайних положений $\Delta T_3 < 0$ и одновременно для получения внутренней компенсации должно быть $\Delta x'_3 > 0$, и, таким образом, $\Delta T_3 / \Delta x'_3 < 0$. На рис. 6, а изображен график функции $T_3 = f'_3 \left(2 + x'_3 + \frac{f_3^2}{x_3^2} \right)$.

Из условия $\Delta T_3 / \Delta x'_3 < 0$ следует, что рабочими ветвями могут быть участки AB или CD , для которых $|\beta_3| \leq 1$. Из рис. 5 ясно, что $s_3 < 0$, и из соотношений $f' = s\beta / (1 - \beta)$ при $f'_3 > 0$ уточняем окончательно возможный интервал изменения β_3 : $-1 \leq \beta < 0$, что соответствует ветви AB (рис. 6, а). Для этого интервала изменение увеличений, как известно, $-s_3 \geq 2f'_3$. Но из рис. 5 очевидно, что $-s_3 = f'_1$ для крайних положений

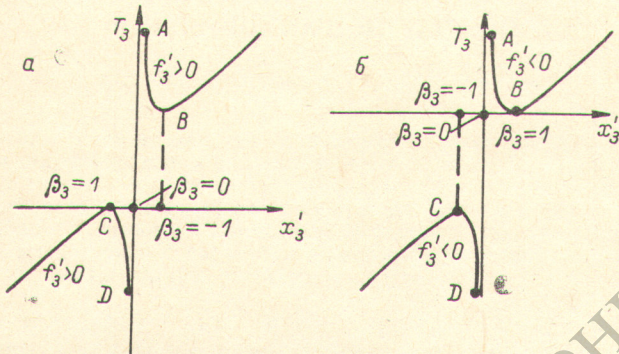


Рис. 6.

перемещающихся компонентов, так как в исходной трехкомпонентной насадке силы внешних компонентов равны, и

$$-s_3 = f'_1 - \Delta T_{\max} \quad (8)$$

для среднего положения, соответствующего $\beta_2 = -1$.

Поэтому приближенно должно быть

$$f'_3 \leq \frac{1}{2} f'_1 \text{ или } \varphi_3 \geq 2\varphi_1 > 0,$$

и более точно, принимая во внимание (5) и (6) и (8), имеем

$$f'_3 \leq \frac{M+1}{2(M-1)} \text{ или } \varphi_3 \geq \frac{2(M-1)}{M+1}. \quad (9)$$

Из (7) следует, что в этом случае $\varphi_4 < 0$.

Таким образом, в четырехкомпонентной насадке с положительным компенсирующим третьим компонентом для получения внутренней механической компенсации, не приводящей к увеличению длины системы, необходимо оптическую силу третьего компонента существенно увеличить по сравнению с исходной трехкомпонентной насадкой.

2. $\varphi_3 < 0$. В этом случае из (7) имеем $\varphi_4 > 0$. Из графика $T(x'_3)$ для $f'_3 < 0$ (рис. 6, б) и условия $\Delta T_3 / \Delta x'_3 < 0$ следует, что рабочими ветвями могут быть AB и CD , для которых по-прежнему $|\beta_3| \leq 1$. Из соотношения $f' = s\beta / (1 - \beta)$ находим окончательно $1 > \beta_3 > 0$, т. е. ветвь AB . В найденной области изменения β_3 в отличие от первого случая не накладывается ограничений на абсолютную величину f'_3 , так как при $f'_3 < 0$ при любом его значении обеспечивается выполнение $s_3 < 0$, что соответствует рис. 5.

Таким образом, при отрицательном компенсирующем компоненте на абсолютную величину φ_3 ограничений не накладывается.

Литература

- [1] М. Г. Ш п я к и н. Автореф. канд. дисс. Л., 1971.
- [2] Д. С. В о л о с о в. Методы расчета сложных фотографических систем. ОГИЗ, 1948.
- [3] В. Н. Ч у р и л о в с к и й. Теория оптических приборов, 376. «Машиностроение», Л., 1966.
- [4] М. Г. Ш п я к и н. Оптико-механич. промышл., № 4, 56, 1967.

Поступило в Редакцию 31 августа 1979 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ