
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.7.013.624

В. С. ЕФРЕМОВ, Д. Г. МАКАРОВА, В. Б. ШЛИШЕВСКИЙ

УСЛОВИЯ ПОСТРОЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

Рассмотрены условия построения двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения с преломляющими и отражающими поверхностями. Приведены примеры расчета в параксиальной области комбинаций фокусных расстояний такого рода систем с 9-кратным изменением увеличения.

Ключевые слова: жидкостные линзы, жидкостные зеркала, жидкостные двухкомпонентные системы, системы переменного увеличения, преломляющая поверхность, отражающая поверхность.

Оптические системы изменения увеличения являются важной составной частью вариообъективов и трансфокаторов. Существующие методы разработки таких систем с переменными характеристиками основаны на предположении, что образующие систему оптические компоненты имеют постоянные оптические силы во всем диапазоне изменения увеличения [1]. Переменное увеличение обеспечивается за счет осевого перемещения оптических компонентов. При механическом способе компенсации смещения плоскости изображения перемещаются два компонента, причем один из них по линейному закону (с помощью винтового механизма), а второй — по нелинейному (с помощью кулачкового механизма); в системах же с оптическим способом компенсации смещения плоскости изображения перемещаются (с помощью высокоточных электромеханических приводов) по линейному закону не менее трех компонентов.

На рис. 1 представлены традиционные схемы построения вариообъективов из тонких компонентов: входной положительный компонент проецирует изображение удаленного объекта на плоскость предметов (ПП) системы изменения увеличения, первый и второй компоненты которой (с оптическими силами Φ_1 и Φ_2) изменяют масштаб изображения в плоскости изображений (ПИ). Плоскости предметов и изображений могут быть разнесены на некоторое расстояние l (рис. 1, а) или совпадать (рис. 1, б, тогда общая длина вариообъектива уменьшается) [1]. Линейное увеличение V системы при заданных (фиксированных) фокусных расстояниях f'_1 , f'_2 компонентов и отрезке $l = -a_1 + d + a'_2$ является функцией трех переменных — отрезков a_1 , a'_2 и расстояния между компонентами d : $V = F(a_1, a'_2, d)$.

В последнее время рассматривается возможность применения жидкостных компонентов — линз [2, 3] и зеркал [4, 5], фокусное расстояние которых, в отличие от обычных твердотельных линз и зеркал, можно изменять (иногда в значительных пределах). В частности, компания “Philips” (Нидерланды) анонсировала оптическую систему “Fluid Focus” [6], работающую за счет изменения электрического потенциала, приложенного к гидрофобному

покрытию. Размеры опытного образца этой системы составляют несколько миллиметров, а перестройка фокусного расстояния производится в диапазоне от 50 мм до бесконечности, причем время перестройки между крайними положениями составляет менее 10 мс. Аналогичными разработками занимаются также компании “Bell Labs” (США), “Varioptic” (Франция) и др.

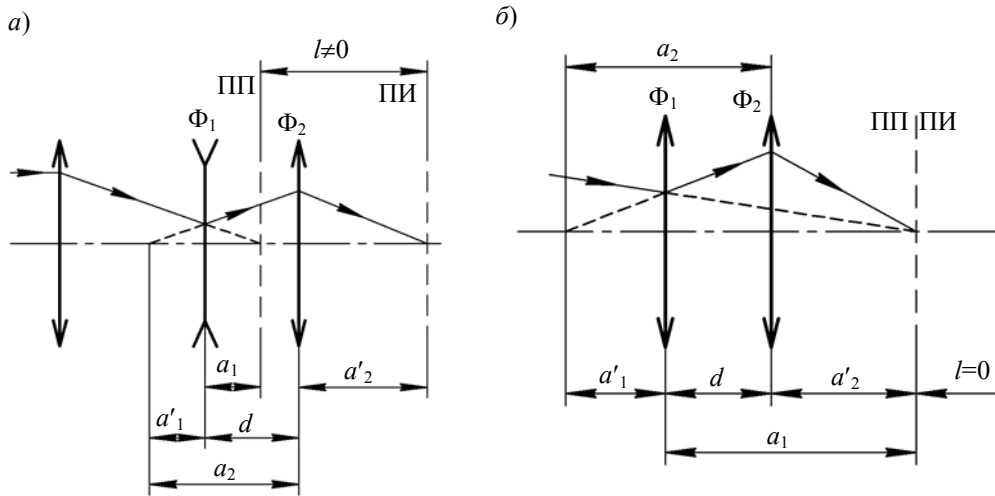


Рис. 1

В подобных оптических системах с неподвижными элементами законы изменения увеличения путем перемещения компонентов утрачивают свою силу и начинают действовать другие закономерности, связанные с вариациями величин f'_1 и f'_2 при постоянных a_1 , a'_2 , d и l . Чтобы установить требуемые зависимости, воспользуемся приведенным в работе [7] общими соотношениями для расчета взаимного расположения элементов классических двухкомпонентных систем переменного увеличения с подвижными вдоль оптической оси преломляющими и отражающими компонентами:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{f'_1 f'_2 (n_3 - n_1 V)}{V (kn_3 f'_1 + n_2 f'_2)}; \\ a'_2 &= \frac{k f'_1 f'_2 (n_3 - n_1 V)}{n_3 V f'_1 + n_2 f'_2}; \\ d &= \frac{n_2 f'_1 f'_2 (k - 1) (n_3 - n_1 V)}{n_3 (kn_1 V f'_1 + n_2 f'_2)}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь n_1 , n_2 и n_3 — показатели преломления сред между компонентами; $k = a_2/a'_1$ — коэффициент, определяющий область существования систем ($0 \leq k \leq 1$); увеличение V определяется как

$$V = \frac{a'_1 a'_2}{a_1 a_2} = \frac{a'_2}{k a_1}, \quad (2)$$

при этом

$$l = a_1^2 \frac{f'_1}{1 + f'_1} + 2a'_2 \frac{f'_2}{1 - a'_2 f'_2}. \quad (3)$$

Последовательно решая систему уравнений (1) относительно f'_1 и f'_2 , получаем

$$f'_1 = \frac{n_2 V a_1 d}{n_2 V a_1 - n_2 a'_2 - n_1 V d}, \quad f'_2 = \frac{n_3 a'_2 d}{n_2 a'_2 - n_2 V a_1 + n_3 d}. \quad (4)$$

Обозначим $f_1'/f_2' = p$, тогда согласно выражениям (4) и (2)

$$\frac{n_2 V a_1 - n_2 a_2' - n_3 d}{(n_1 d - n_2 a_1) V + n_2 a_2'} = \frac{n_3}{n_2} k p$$

и

$$V = \frac{n_3 a_2' k p + n_2 a_2' + n_3 d}{n_3 (n_2 a_1 - n_1 d) k p + n_2^2 a_1} n_2. \quad (5)$$

При заданных n_1, n_2, n_3 и a_1, a_2', d формула (5) выражает закон изменения увеличения V в зависимости от параметра k и соотношения p между фокусными расстояниями компонентов.

На рис. 2 показаны возможные варианты двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения: *а* — линзовая система (ЛС), *б* — линзово-зеркальная система (ЛЗС), *в* — зеркально-линзовая система (ЗЛС), *г* — зеркальная система (ЗС).

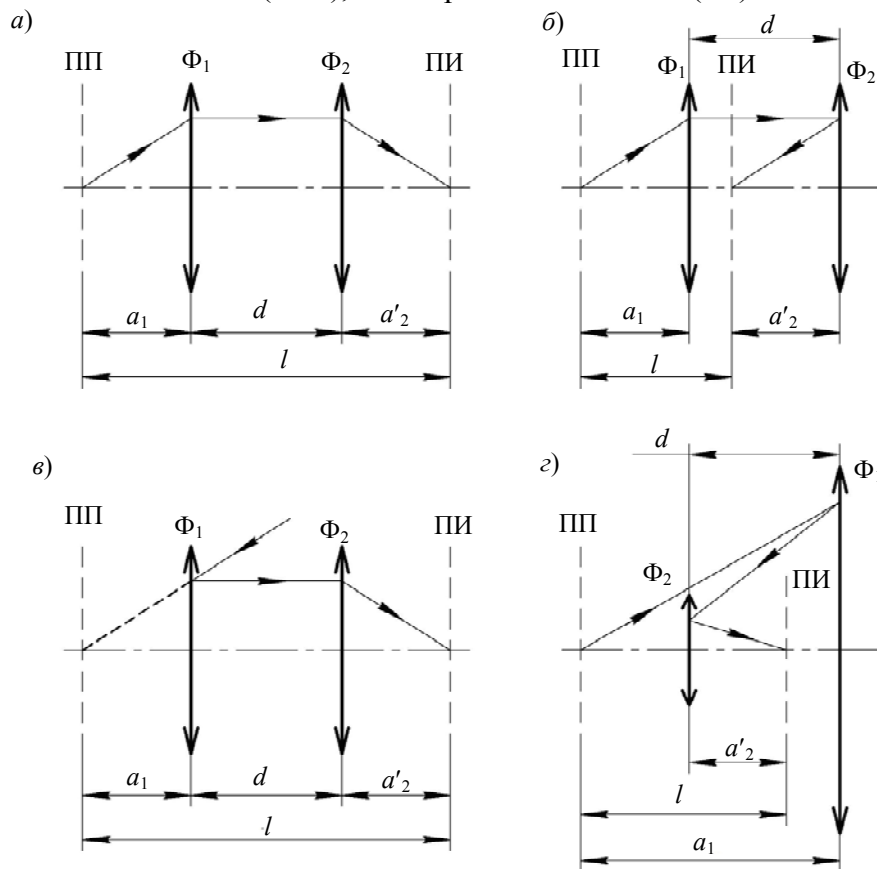


Рис. 2

Для наиболее типичной ситуации, когда компоненты разделены воздушными промежутками, для параксиальной области в соответствии с выражением (5) имеем:

— для ЛС ($n_1 = n_2 = n_3 = 1$)

$$V = \frac{a_2' (k p + 1) + d}{(a_1 - d) k p + a_1};$$

— для ЛЗС ($n_1 = n_2 = -n_3 = 1$)

$$V = \frac{a_2' (k p - 1) + d}{(a_1 - d) k p - a_1};$$

— для ЗЛС ($-n_1 = n_2 = n_3 = 1$)

$$V = \frac{a'_2(kp+1)+d}{(a_1+d)kp+a_1};$$

— для ЗС ($n_1 = -n_2 = n_3 = 1$)

$$V = \frac{a'_2(kp-1)+d}{(a_1+d)kp-a_1}.$$

Соответствующие формулы для фокусных расстояний f'_1 и f'_2 компонентов в зависимости от текущего значения увеличения V , согласно выражению (4), приведены в табл. 1.

Таблица 1

f'	ЛС	ЛЗС	ЗЛС	ЗС
f'_1	$\frac{a_1 V d}{a_1 V - a'_2 - V d}$		$\frac{a_1 V d}{a_1 V - a'_2 + V d}$	
f'_2	$\frac{a'_2 d}{a'_2 - a_1 V + d}$	$\frac{a'_2 d}{a_1 V - a'_2 + d}$	$\frac{a'_2 d}{a'_2 - a_1 V + d}$	$\frac{a'_2 d}{a_1 V - a'_2 + d}$

В качестве примера в табл. 2, 3 и на рис. 3 представлены результаты численной оценки фокусных расстояний компонентов рассматриваемых систем с увеличением, изменяющимся от 0,1 до 0,9 при одинаковых исходных параметрах: $a_1 = 100$ мм, $a'_2 = 50$ мм, $d = 50$ мм, $l = 0$. Видно, что для достижения одинакового перепада увеличений зеркально-линзовые системы предпочтительнее линзовых, так как требуют меньшего изменения фокусного расстояния зеркального компонента. Неполная сходимость проверки $l = 0$ по формуле (3) объясняется округлением значений фокусных расстояний компонентов до 0,01 мм.

Таблица 2

V	ЛС				ЛЗС			
	f'_1 , мм	f'_2 , мм	l , мм	p	f'_1 , мм	f'_2 , мм	l , мм	p
0,10	-11,11	27,78	-0,00066	-0,400	-11,11	250,00	0,00164	-0,044
0,20	-25,00	31,25	-0,00060	-0,800	-25,00	125,00	0,00048	-0,200
0,30	-42,86	35,71	-0,00051	-1,200	-42,86	83,33	-0,00001	-0,514
0,40	-66,67	41,67	-0,00039	-1,600	-66,67	62,50	-0,00034	-1,083
0,50	-100,00	50,00	-0,00027	-2,000	-100,00	50,00	-0,00060	-2,000
0,60	-150,00	62,50	-0,00014	-2,400	-150,00	41,67	-0,00083	-3,600
0,70	-233,33	83,33	-0,00066	-2,800	-233,33	35,71	-0,00103	-6,534
0,80	-400,00	125,00	-0,00060	-3,200	-400,00	31,25	-0,00123	-12,800
0,90	-900,00	250,00	-0,00051	-3,600	-900,00	27,78	-0,00142	-32,400

Таблица 3

V	ЗЛС				ЗС			
	f'_1 , мм	f'_2 , мм	l , мм	p	f'_1 , мм	f'_2 , мм	l , мм	p
0,10	-14,29	27,78	-0,00004	-0,514	-14,29	250,00	0,00124	-0,057
0,20	-50,00	31,25	-0,00088	-1,600	-50,00	125,00	0,00008	-0,400
0,30	-300,00	35,71	-0,00105	-8,401	-300,00	83,33	-0,00041	-3,600
0,40	200,00	41,67	-0,00106	4,800	200,00	62,50	-0,00074	3,200
0,50	100,00	50,00	-0,00100	2,000	100,00	50,00	-0,00100	2,000
0,60	75,00	62,50	-0,00091	1,200	75,00	41,67	-0,00123	1,800
0,70	63,64	83,33	-0,00079	0,764	63,64	35,71	-0,00143	1,783
0,80	57,14	125,00	-0,00067	0,457	57,14	31,25	-0,00163	1,818
0,90	52,94	250,00	-0,00054	0,212	52,94	27,78	-0,00182	1,906

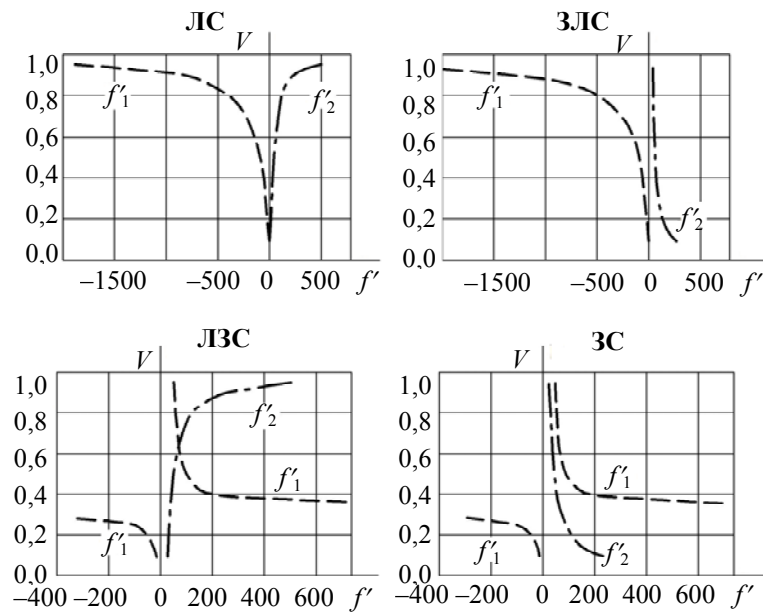


Рис. 3

Найденные взаимосвязи позволяют выбрать требуемые значения a_1 , a'_2 , d и l на основе определения оптимальной комбинации фокусных расстояний f'_1 и f'_2 в заданных пределах изменения увеличения V , что в результате обеспечивает возможность упрощения конструкции системы и придания ей новых свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
2. Pat. 8238033 US. Liquid Lens Device and Manufacturing Method Therefor / Y. Takai, T. Yoshida, M. Shimase, H. Ishiguro. 07.08.2012.
3. Голицын А. В., Ефремов В. С., Михайлов И. О., Оревова Н. В., Федоров Б. В., Шлишевский В. Б. Жидкие линзы — новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов // Сб. материалов Междунар. науч. конф. „СибОптика—2013“; IX Междунар. выставка и научный конгресс „Интерэкспо ГЕО-Сибирь—2013“. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. С. 7—11.
4. Пат. 2073268 РФ. Способ управления кривизной адаптивного зеркала и адаптивное зеркало для его осуществления / В. А. Алексеев, З. И. Ашурлы, С. В. Науменко, С. С. Науменко, С. А. Филлин. 10.02.1997.
5. Pat. 7525722 US. Liquid Mirror / P. R. Colodner, T. N. Krupenkin, O. Sydorenko, J. Taylor. 28.04.2009.
6. Pat. 7126903 US. Variable Focus Lens / J. Feenstra, S. Kuiper, S. Stallinga, B. H. W. Hendriks, R. M. Snoeren. 10.24.2006.
7. Ефремов В. С. Расчет в параксиальной области двухкомпонентных панкратических систем, содержащих зеркальные компоненты // Оптико-механическая промышленность. 1978. № 8. с. 24—26.

Сведения об авторах

- Виктор Сергеевич Ефремов** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;
E-mail: ews49@mail.ru
- Диана Георгиевна Макарова** — аспирант; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;
E-mail: diana_ssga@mail.ru
- Виктор Брунович Шлишевский** — д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;
E-mail: svb_dom@ngs.ru

Рекомендована кафедрой
наносистем и оптотехники

Поступила в редакцию
02.12.13 г.