электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель Общероссийская общественная организация "Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова"
ISSN 2307-0609

 # 09, сентябрь 2017

УДК 535.317

Расчет пико-проектора переменного увеличения

Сунарчина Э.А., *магистр*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»
toova@mail.ru

Научный руководитель: Пискунов Д.Е., к.т.н.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»
piskunovde@gmail.com

Аннотация: Предложенная методика синтез компактных СПУ применяется для расчета объектива пико-проектора. Габаритный синтез компактных СПУ основан на применении обобщенных параметров И.И. Пахомова. Представлены формулы перехода от обобщенных систем к исходным системам. Предложен вариант схемы оптической системы пико-проектора на основе разработанного метода расчета.

Ключевые слова: пико-проектор (pico-projector), система переменного увеличения (zoom lens system), объектив пико-проектора (lens module of pico-projector)

Введение

Тенденция разработки проекторов заключается не только в обеспечении требуемого качества изображения, но и в уменьшении размеров самого проектора. Фирма Explay в 2003 году сообщила о решении спроектировать компактный проектор [1]. В октябре 2006 года состоялась первая публичная демонстрация продукции под названием «Explay Nano Projector». В 2007 году компания Texas Instruments (TI) представила свой концепт компактного проектора для мобильных устройств с использованием специального DLP-чипа. Продукт был анонсирован под названием «Pico Projector». Стоит отметить, что «Pico» в название не имеет прямого отношения к системе СИ и является лишь ответом конкуренту Explay. Таким образом, пико-проектор переменного увеличения можно рассматривать, как систему переменного увеличения (СПУ) небольших габаритов. С 2014 года на рынке представлены миниатюрные дисплеи (DLP-чип) с уменьшенным

размером пикселя 5,4 мкм, которые наилучшим образом подходят для применения в качестве дисплея пико-проектора [2].

Компактные СПУ могут состоять из двух, трех или четырех компонентов [3-5]. Как правило, в таких системах перемещаются два компонента, а остальные компоненты остаются неподвижны. Так же на конструкцию пико-проектора накладывается дополнительное условие: большой задний отрезок для согласования объектива с осветительной системой проектора. Еще одним требованием является телецентричность хода главных лучей для эффективности и равномерности света в проекторах, работающих на основе отражения микрозеркальных (DLP) или жидкокристаллических (LCoS) дисплеев.

Габаритный синтез СПУ с двумя подвижными компонентами

Расчет панкратических систем рассматривается в работах Ф. Бэка, Д.С. Волосова, К. Танаки, И.И. Пахомова и др.

Анализ показал, что в качестве структурной схемы пико-проектора выбирают трехкомпонентные системы с перемещением второго и третьего компонентов или четырехкомпонентные схемы с перемещением второго и третьего компонентов. Обе схемы эквивалентны двухкомпонентной системе с первым и вторым подвижными компонентами, которая представлена на рис.1.

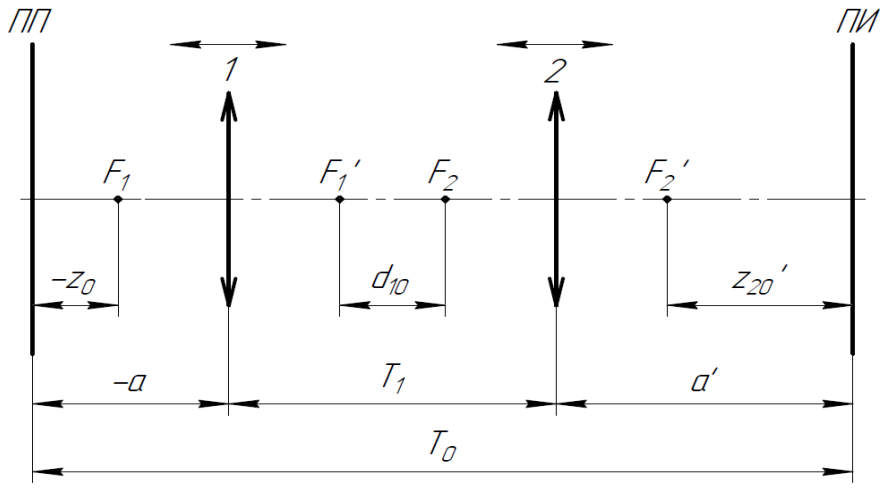

Рис. 1. Двухкомпонентная система с подвижными компонентами

В работах [6-8] развита теория обобщенных параметров панкратических систем, используя которую можно определить гауссовы параметры системы, обеспечивающие заданное увеличение.

Обобщенные параметры для двухкомпонентной СПУ можно рассчитать по следующим формулам [5]:

$$Z_0 = \frac{\alpha(\beta y - 1)}{\alpha^2 y - \beta}, Z'_{20} = \alpha y, F_2^2 = \alpha^2 y^2 - \beta y, D_{10} = Z_{20}{}' - Z_{.0},$$

$$F_1^2 = \frac{\beta y - 1}{(\alpha^2 y - \beta)^2} M, \alpha = \frac{1 - M}{2}, \beta = \frac{1 + M}{2},$$

где M — перепад увеличений, y — обобщенный параметр, характеризующий передаточное отношение последнего компонента и величину смещения плоскости изображения.

С помощью обобщенных параметров составляют универсальные таблицы базовых СПУ, используя которые можно рассчитать основные параметры системы любого типа. Для системы, представленной на рис.1, передаточные отношения $i_0 = 0; i_1, i_2 \neq 0$. Тогда основные параметры можно найти по формулам [9]:

$$z'_{20} = Z'_{20} b_1 i_1, f_2^2 = F_2^2 (b_1^2 - b_1) i_1^2, z_0 = -Z_0(M, y) i_1,$$
$$d_{10} = D_{10}(b_1 - 1) i_1, f_1^2 = F_1^2 (1 - b_1) i_1^2, b_1 = i_2 / i_1,$$

где i_0, i_1, i_2 — величины, характеризующие передаточные отношения между перемещениями компонентов.

Значение b_1для обеспечения заданного увеличения β_0 в среднем положении:

$$b_1 = -\frac{f_1 z'_{20}}{f_2 z_0}.$$

В работе [9] определены требуемое значение параметраi_1,увеличение β_0и законы перемещения компонентов:

$$i_1 = \frac{T_0}{2F\sqrt{b_1^2 - b_1} + 2F_1\sqrt{1 - b_1} + Z_0 + Z'_{20} b_1 + D_{10}(b_1 - 1)},$$

$$\beta_0 = -\frac{f_1 z'_{20}}{f_2 z_0},$$

$$a' = \frac{1 - \beta - T_1 \overline{\phi_1}}{\overline{\phi_1} + \overline{\phi_2} - T_1 \overline{\phi_1 \phi_2}}, a = \frac{1\beta + T_1 \overline{\phi_2} - 1}{\overline{\phi_1} + \overline{\phi_2} - T_1 \overline{\phi_1 \phi_2}},$$

$$T_1 = \frac{T_0}{2}(1 \pm \sqrt{1 - 4A}), A = \frac{\overline{\phi_1} + \overline{\phi_2}}{T_0 \overline{\phi_1 \phi_2}} + \frac{(\beta - 1)^2}{T_0^2 \beta \overline{\phi_1 \phi_2}}.$$

Формулы перехода от обобщенной системы к исходным системам, рассмотрены для случая расположения предмета в бесконечности [9]. В данной работе предлагается при переходе использовать известные формулы для предмета, расположенного на конечном расстоянии, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

Формулы перехода систем

Тип системы	Параметры оптимизации	Формулы перехода от исходных систем к обобщенной системе	Формулы перехода от обобщенной системы к исходным системам
Система №1 (см. рис. 1)	ϕ_1 y	$\beta_{\text{СПУ}} = \frac{\beta_0'}{\beta_1}, T_0 = L - \frac{(1-1\beta_1)}{\phi_1}$	$\phi_2 = \overline{\phi_1}, \phi_3 = \overline{\phi_2}, d = T_1, d_3 = a'$ $d_1 = -a + \frac{(1-1\beta_1)}{\phi_1},$

Обозначения в таблице: ϕ_i — оптическая сила i-го компонента, d — расстояние между компонентами, L — длина всей системы, $\beta_0' = \sqrt{\beta_{\min}\beta_{\max}}$ — увеличение системы в среднем положении, $\beta_{\text{СПУ}}$ — увеличение обобщенной системы .

Габаритный синтез СПУ наименьшей длины

Метод расчета основных параметров двухкомпонентной СПУ наименьшей длины представлен в [6], двухкомпонентную панкратическую систему называют системой наименьше длины, если в одном из крайних положений плоскости первого и второго компонентов совпадают (рис.2).

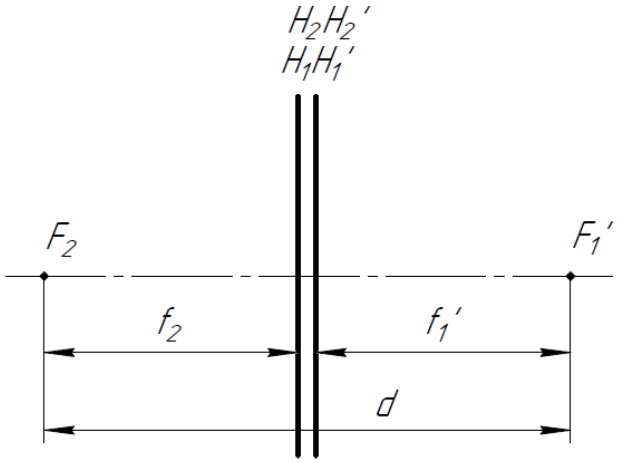

Рис. 2. Схема панкратической системы наименьшей длины

Условие получения системы наименьшей длины имеет следующий вид:

$$f_1 + f_2 = d. \tag{1}$$

Условие (1) должно выполняться при:

$$f_1 + f_2 = d_0 - i_2 + i_1. \tag{2}$$

Для общего случая, подвижны все компоненты и предметная плоскость условия (2) принимает вид:

$$\sqrt{(i_0 - i_1)\frac{i_2 - i_1}{i_2}} f_1 + \sqrt{\frac{i_2 - i_1}{i_2}} f_2 = \frac{i_2 - i_1}{i_2} d_0 - i_2 + i_1,$$

где f_1, f_2 - фокусные расстояния компонентов для случая: подвижные предметная плоскость и второй компонент. Заменой $y^2 = i_0 - i_1$, получают формулу[1]:

$$y^2 \left[\frac{(d_0 - i_2)^2}{i_2} - f_1^2\right] - 2f_1 f_2 y + (i_2 - 1)\frac{(d_0 - i_2)^2}{i_2} - f_2^2 = 0. \quad (3)$$

Решая квадратное уравнение относительно y, можно найти значения для i_1, i_0, при которых система имеет наименьшую длину. Полученное решение будет соответствовать случаю перемещения ПП и второго компонента. Для перехода к системе с неподвижной предметной плоскостью предполагают, что $i_0 = 0$. Далее решают квадратное уравнение (3) и находят i_1, определяющее систему наименьшей длины для данного случая. Найти решение, которое удовлетворяло бы заданным требованиям к основным параметрам системы сложно, т.к. необходимо рассчитать два перехода систем, что приводит к изменению увеличения и длины системы.

Расчет объектива пико-проектора переменного увеличения

На основе рассмотренных выше методов проведен расчет основных параметров пико-проектора. Современные компактные проекторы предназначены для экранов диагональю: 40 РМ…60 РМ т.е. требуемый перепад увеличения $M = 1{,}5$. Проекционное соотношение: 1,1, и, следовательно, проекционное расстояние: L =885,5 мм. Высота микродисплея пико-проектора: $d_{\text{дис.}}$ =5,8 мм. Для согласования осветительной системы с объективом назначим расстояние от микродисплея пико-проектора до первого компонента: $d_1 = 30$ мм. Результат расчета основных параметров объектива пико-проектора приведен в таблице. 2.

Таблица 2

Основные параметры системы пико-проектора

Номер позиции	β	$f_{1'}$, мм	$f_{2'}$, мм	$f_{3'}$, мм	$d_{\text{АД}}$, мм	d_2, мм	d_3, мм	d_4, мм
1	170	20,0000	40,9077	6,4720	20,0000	16,0032	21,6446	88,3535
2	210					29,3781	14,9533	881,6702
3	256					38,0686	8,3646	879,5671

Принятые обозначения в таблице: $d_{\text{АД}}$ — расстояние между апертурной диафрагмой и вторым компонентом,d_2,d_3, d_4— расстояние между соответствующими компонентами.

Аберрационный синтез объектива пико-проектора выполнен на основе теории аберраций третьего порядка. После введения толщин линз, а также оптимизации была получена система (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Конструктивные параметры объектива пико-проектора

Номер поверхности	Радиусы, мм	Толщины, мм	Параметры стекла
1		883,353…879,587	
2	-1,769	1,861	1,81; 25,40
3	-2,013	2,914	
4	5,555	1,258	1,50; 57,00
5	-8,935	0,832	
6	10,787	0,500	1,45; 92,00
7	-5,534	0,500	
8		13,780…0,499	
9	24,849	1,102	1,74; 50,00
10	30,961	2,242	
11	-9,325	0,537	1,81; 25,40
12	-8,525	1,035	
13	19,341	1,912	1,45; 92,00
14	28,168	0,634	
15		8,542…21,916	
16		0,499	
17	51,787	3,033	1,74; 50,30
18	-12,446	0,872	
19	-10,763	1,176	1,81; 25,40
20	-23,798	2,874	
21	29,204	3,140	1,45; 92,00
22	-1149,123	0,634	
23		7,771	
24		30,000	

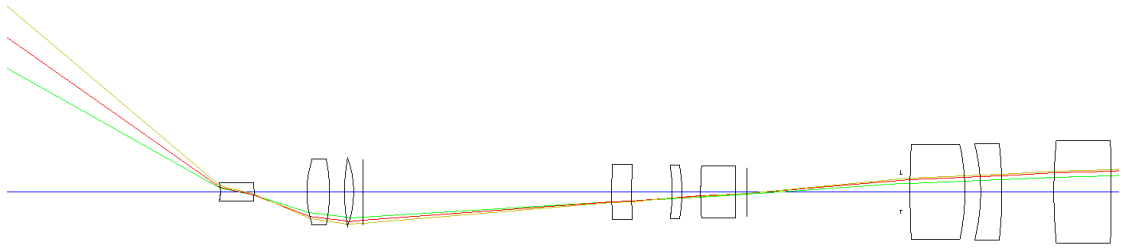

Рис. 3. Объектив пико-проектора при $\beta = 256$

Заключение

В статье рассмотрен габаритный синтез СПУ с двумя подвижными компонентами. Предложены формулы перехода от обобщенной системы к исходным системам для предмета на конечном расстоянии. На основе приведенного синтеза рассчитан объектив пико-проектора с характеристиками: экран 40 РМ…60 РМ, перепад увеличения $M = 1{,}5$, проекционное соотношение равное 1,1, высота микродисплея пикопроектора: $d_{\text{дис.}}$ =5,8 мм, расстояние от микродисплея пикопроектора до первого компонента: $d_1 = 30$ мм.

Список литературы

[1]. Пико-проектор. // Сайт Википедия. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B8%D0%BA%D0%BE-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80 (дата обращения: 22.11.2016).

[2]. DLP4710 (ACTIVE), DLP® 0.47 1080p DMD. // Сайт Texas Instruments. Режим доступа: http://www.ti.com/product/DLP4710 (дата обращения: 22.11.2016)

[3]. Ян Чжэнтао, Сюй Цзуган, Хуан Шаоюн. Проекционная линза для пико-проектора DLP. (Исходный текст на китайском языке). Патент CN 105527698 A. 27.04.2016.

[4]. Lee H.-J., Kim J.-H., Hwang S.-H., Hong S.-K. Projection lens unit for pico-projector. United States Patent US 8929003 B2. 2015. 7 p.

[5]. Ohashi K. Compact zoom lens and a camera using a zoom lens. United States Patent US 6353506 B1. 2002. 39 p.

[6]. Пахомов И.И. Панкратические системы. М.: Машиностроение. 1976. 160 с.

[7]. Пахомов И.И. Расчет двухкомпонентных систем переменного увеличения // Оптико-механическая промышленность. 1981. № 5. С. 15–19.

[8]. Пахомов И.И. Трехкомпонентные панкратические системы с механической компенсацией. Оптико-механическая промышленность. 1982. № 6. С. 22–25.

[9]. Пискунов Д.Е. Методика синтеза высококачественных вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов: автореферат дис. … канд. техн. наук. М., 2013. 16 с.