
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317.1;535.317.227;681.775.5;681.772.3

Л. Н. АНДРЕЕВ, А. В. БАХОЛДИН, Ю. К. ПРУНЕНКО

ОПТИКА ЦИФРОВОГО КИНЕМАТОГРАФА

Рассматриваются требования, предъявляемые к системам цифрового кинематографа. Определены основные характеристики проекционной и киносъёмочной оптики цифрового кинематографа.

Ключевые слова: цифровой кинематограф, анаморфотная оптика, расчет оптических систем.

В начале XXI в. возможность использования цифровых технологий записи изображений в области традиционного кино привела к созданию цифровой видеотехники. На основе телевидения высокой четкости (ТВЧ) и новой видеотехники была разработана система цифрового кинематографа. Под термином „цифровой кинематограф“ понимают совокупность процессов, которая приводит к публичному показу кинофильма электронными средствами, при этом особое значение придается проекторам, использующим цифровые изображения [1]. Основным преимуществом использования цифровой технологии в кинематографе является возможность записи, передачи и копирования информации без искажений — в форме, идентичной оригиналу. При использовании в работе с кинолентой аналоговых технологий происходит потеря качества информации в ходе копирования, передачи и особенно — воспроизведения изображения. Помимо того, цифровая форма представления информации значительно более гибкая, нежели аналоговая. Использование цифровых технологий приводит к экономии времени и финансовых средств на техническое оснащение, производство и постпроизводство кинокартин. Более подробно преимущества и недостатки уже созданных систем цифрового кинематографа в техническом и экономическом отношении рассмотрены в работах [2—4].

Ведущие киностудии США и Японии в 2005 г. опубликовали концепцию развития мирового цифрового кинематографа [5], которая, по существу, является техническим заданием на разработку комплекса технологических средств цифрового кинематографа, она стала основой для создания международных стандартов этого комплекса. В концепции изложен ряд требований, в основном относящихся к качеству изображения, которое должно быть как минимум сопоставимо с качеством систем традиционного (35-миллиметрового киноплёночного) кинематографа (или выше его). Предусматриваются только два класса систем цифрового кинематографа, разрешение которого — 2К и 4К — соответствует числу активных пикселей светочувствительной матрицы камеры и модулирующей матрицы проектора по горизонтали и вертикали — 2048/1080, 4096/2160. Частота смены кадров в системе 2К — 24 и 48 кадра в секунду, в системе 4К — 24 кадра в секунду [5].

Существуют различные модулирующие матрицы, построенные с использованием разных принципов преобразования излучения. В настоящей работе выбраны для расчетов две

модулирующие матрицы — DMD (Digital Micromirror Device), матрица с разрешающей способностью 2040/1080 пикселей и диагональю 0,94 дюйма [6], и LCOS (Liquid Crystal on Silicon), матрица с диагональю 1,27 дюйма и разрешающей способностью 4096/2400 пикселей [7].

При определении основных характеристик оптических систем камеры и электронного проектора следует исходить из качества воспринимаемого зрителем изображения. Качество зависит от разрешающей способности проекционной системы N_0 , ширины $Ш$ и высоты $В$ изображения на экране, расстояния от экрана до зрителей a_3 и угла визирования ω'_1 , а также от разрешающей способности оптической системы съемочной камеры. При этом на экране не должна быть различима пиксельная структура изображения.

Такие параметры зрительных залов, как размер рабочего поля киноэкрана, расстояние от зрителей до экрана, рассчитываются при кинотехнологическом проектировании кинозала в соответствии с рекомендациями ОСТ 19-154-2000 [8] и SMPTE EG 18-1994 [9]. Следует учесть, что в кинозале могут демонстрироваться фильмы разных кинематографических форматов. В настоящее время — это форматы с соотношением сторон изображения на экране 2,35:1 — широкоэкранный кино с анаморфированным кадром, 1,66:1 и 1,85:1 — широкоэкранный кино с кашетированным кадром, 1,37:1 — традиционный формат с использованием пленки 35 мм и формат 1,78:1 — ТВЧ. Результаты расчета основных геометрических параметров зрительных залов вместимостью 2050, 850 и 250 зрительских мест приведены в табл. 1 ($Д$ — длина зала; ширина рабочего поля киноэкрана при: $Ш_{ш}$ — широкоэкранный, $Ш_{к}$ — кашетированный, $Ш_{о}$ — обычной, $Ш_{ц}$ — ТВЧ проекции).

Таблица 1

Параметр	Вместимость зала, мест		
	2050	850	250
$Д$, м	45	36	25
$В$, м	8,55	7,56	5,32
$Ш_{ш}$, м	20,093	18	12,5
$Ш_{к}$, м	15,818	13,968	9,84
$Ш_{о}$, м	11,714	10,357	7,287
$Ш_{ц}$, м	15,219	13,456	9,468
a_3 , м	17,10	15,12	9,375

Зная основные параметры кинозала и размеры матриц, используемых в проекторах, можно определить основные характеристики проекционных объективов. На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема процесса проекции (y_p — размер пикселя модулирующей матрицы, a_2 — расстояние от матрицы проектора до объектива, ω'_2 — угловое поле в пространстве изображения проектора, ω'_3 — угловой размер пикселя, a'_2 — расстояние от объектива проектора до киноэкрана — в настоящей работе длина зрительного зала, γ — угловой предел разрешения глаза наблюдателя. Линейное увеличение объектива проектора $\beta_{\text{Юп}}$ при обычной, кашетированной, ТВЧ и широкоэкранный проекции находим из формулы:

$$\beta_{\text{Юп}} = -Ш/b,$$

где b — ширина модулирующей матрицы проектора.

Для широкоэкранный проекции с анаморфированным кадром применяют анаморфотные насадки или объективы, которые имеют разное линейное увеличение по горизонтали и вертикали и, как следствие — разные фокусные расстояния. Линейное увеличение такого объектива в вертикальном сечении $\beta_{\text{Юп}}$ определяется формулой:

$$\beta_{\text{Юп}} = -В/h,$$

где h — высота модулирующей матрицы проектора.

Отрицательное значение линейного увеличения означает, что оптическая система создаст перевернутое изображение.

Фокусное расстояние проекционного объектива $f'_{\text{Iоп}}$ определяется формулой:

$$f'_{\text{Iоп}} = \frac{a_2'^2}{a_2' - \beta_{\text{Iоп}}}.$$

Фокусное расстояние анаморфотного объектива во втором сечении $f'_{\text{IIоп}}$ определяется формулой:

$$f'_{\text{IIоп}} = \frac{f'_{\text{Iоп}} \beta_{\text{IIоп}} (1 - \beta_{\text{Iоп}})^2}{\beta_{\text{Iоп}} (1 - \beta_{\text{IIоп}})^2}.$$

Качество изображения, создаваемого „идеальной“ оптической системой, определяется в основном явлениями дифракции и непосредственно зависит от отношения задней апертуры A' к длине волны λ [10]. Требуемая разрешающая сила кинопроекторного объектива N_0 определяется условиями проекции — линейным увеличением $\beta_{\text{Iоп}}$ и расстоянием a_3 от зрителя до киноэкрана [11]:

$$N_0 \geq \frac{\beta_{\text{Iоп}}}{\gamma a_3}.$$

При достаточной яркости и высоком контрасте деталей изображения угловой предел разрешения глаза можно принять равным одной угловой минуте, тогда задняя апертура A' определяется формулой:

$$A' = N_0 \lambda.$$

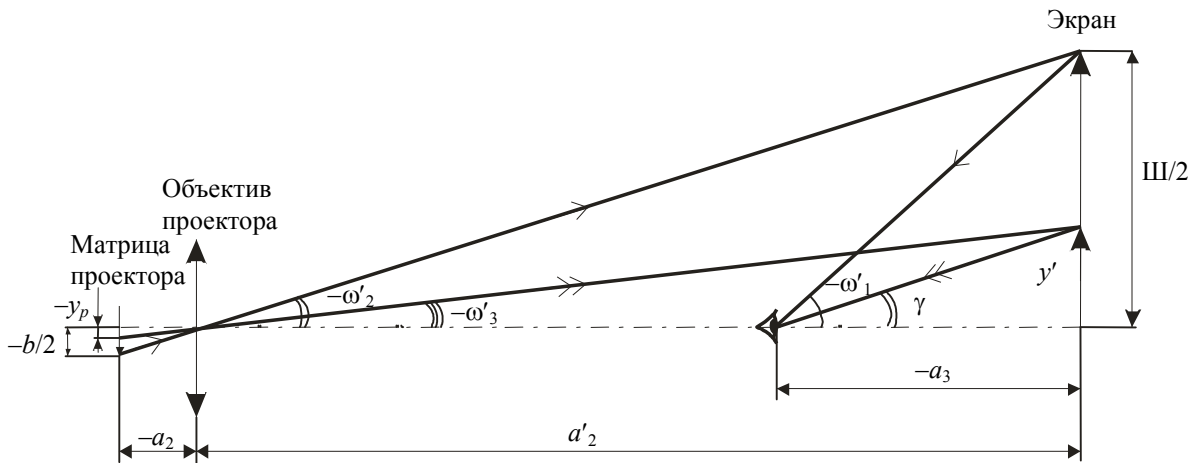


Рис. 1

Одним из условий проекции изображения высокого качества является неразличимость пиксельной структуры изображения, проявляющейся в виде наложенной на него сетки. Определить границу неразличимости пиксельной сетки, т.е. допустимый размер промежутка между пикселями модулирующей матрицы, на экране можно, зная величину угла, при котором объект не воспринимается глазом, а также параметры проекционного объектива и кинозала. Известно, что пороговое значение γ , при котором объект уже воспринимается глазом, составляет одну угловую минуту [12]. Из рис. 1 видно, что величину изображения на экране y' , уже видимую глазом, можно представить следующим образом:

$$y' = \text{tg}(\gamma) a_3, \tag{1}$$

тогда максимальный размер промежутка между пикселями y_g определяется формулой

$$y_{\text{Iг}} = \frac{y'}{\beta_{\text{Iоп}}}. \tag{2}$$

При широкоэкранный проекции предельный размер промежутка между пикселями во втором сечении y_{IIg} определяется формулой

$$y_{IIg} = \frac{y'}{\beta_{IIоп}}. \quad (3)$$

Допустимый размер одного пикселя модулирующей матрицы y_p определяется из условия неразличимости пиксельной структуры изображения на киноэкране. Порог различимости двух светящихся точек возникает, когда угол, под которым они рассматриваются, больше или равен двум угловым минутам [12], тогда y_p находится по формулам (1)—(3). Результаты расчета для трех зрительных залов приведены в табл. 2 (увеличение и фокусное расстояние в горизонтальном и вертикальном сечениях, кроме формата 2,35:1, совпадают).

Таблица 2

Параметр	Вместимость зала, мест											
	2050				850				250			
	Кинематографический формат											
	1,37:1	1,85:1	2,35:1	1,78:1	1,37:1	1,85:1	2,35:1	1,78:1	1,37:1	1,85:1	2,35:1	1,78:1
DMD-матрица с диагональю 0,94 дюйма (пиксел 10,8 мкм)												
$\beta_{IIоп}$ ($\beta_{IIоп}$)	-565	-763	-969 (-733)	-734	-499	-674	-868 (-648)	-649	-351	-475	-603 (-456)	-457
A'	0,063	0,085	0,107	0,081	0,063	0,084	0,109	0,081	0,071	0,096	0,122	0,092
$f'_{IIоп}$ ($f'_{IIоп}$), мм	79,54	58,93	46,41 (61,34)	61,24	71,94	53,37	41,45 (55,49)	55,40	70,95	52,58	41,43 (54,72)	54,64
y_p , мкм	17,6	13,0	10,3	13,6	17,6	13,1	10,1	13,6	15,5	11,5	9,1	12,0
y_g , мкм	8,8	6,5	5,1	6,8	8,8	6,5	5,1	6,8	7,8	5,8	4,5	6,0
D-ILA-матрица с диагональю 1,27 дюйма (пиксел 6,8 мкм)												
$\beta_{IIоп}$ ($\beta_{IIоп}$)	-406	-548	-696 (-505)	-527	-359	-484	-624 (-447)	-466	-252	-341	-433 (-314)	-328
A'	0,045	0,061	0,077	0,058	0,045	0,061	0,078	0,058	0,051	0,069	0,088	0,066
$f'_{IIоп}$ ($f'_{IIоп}$), мм	110,64	81,98	64,6 (88,88)	85,2	100,1	74,25	57,68 (80,39)	77,07	98,66	73,13	57,66 (79,26)	76,00
y_p , мкм	24,5	18,2	14,3	18,9	24,5	18,2	14,1	18,9	21,6	16,0	12,6	16,6
y_g , мкм	12,3	9,1	7,1	9,4	12,2	9,1	7,0	9,4	10,8	8,0	6,3	8,3

Проанализировав данные табл. 2, можно заключить, что один и тот же проектор может быть использован для демонстрации фильмов в больших и малых кинозалах с набором объективов (см. табл. 2), необходимым для проекции фильмов различных форматов. Максимальные значения задней апертуры, определяемой разрешающей способностью матрицы, присущи анаморфотным объективам. Как показали расчеты, при использовании проекторов с разрешающей способностью 2К и 4К на экране не будет различима пиксельная структура изображения. Однако при показе широкоэкранных фильмов проекторы, созданные на основе DMD-матриц, не смогут обеспечить высокого качества изображения, так как на экране зритель будет различать пиксельную структуру изображения. Для демонстрации широкоэкранных фильмов во всех кинозалах нужно использовать проекторы с разрешающей способностью 4К. При показе фильмов других форматов высокое качество изображения будет обеспечиваться проекторами, имеющими модулирующие матрицы с разрешающей способностью 2К и более.

Правильная передача перспективы изображения обеспечивается при видимом увеличении $\bar{\Gamma}$, равном единице [13]. Фокусные расстояния объектива кинокамеры f'_I и при широкоэкранный проекции во втором сечении f'_{II} находятся из формул

$$f'_I = -\frac{a_1 a_3 \bar{\Gamma}}{a_3 \bar{\Gamma} + a_1 \beta_{IIоп} q},$$

$$f'_{II} = -\frac{a_1 a_3 \bar{\Gamma}}{a_3 \bar{\Gamma} + a_1 \beta_{IIOP} q},$$

где a_1 — дистанция киносъемки (расстояние от предмета до объектива); q — отношение размера диагонали модулирующей матрицы проектора к диагонали светочувствительной матрицы камеры.

Линейное увеличение β оптических элементов, составляющих „цепочку“ формирования изображения (рис. 2) в каждом сечении определяется соответственно:

$$\beta = \beta_{IK} \beta_{IOP},$$

$$\beta_2 = \beta_{IIK} \beta_{IIOP},$$

где $\beta_{IK} = f'_1 / (a_1 + f'_1)$ — линейное увеличение при съемке камерой; $\beta_{IIK} = f'_{II} / (a_1 + f'_{II})$ — линейное увеличение в вертикальном сечении при съемке камерой. На рис. 2 y_1 — линейный размер предмета.

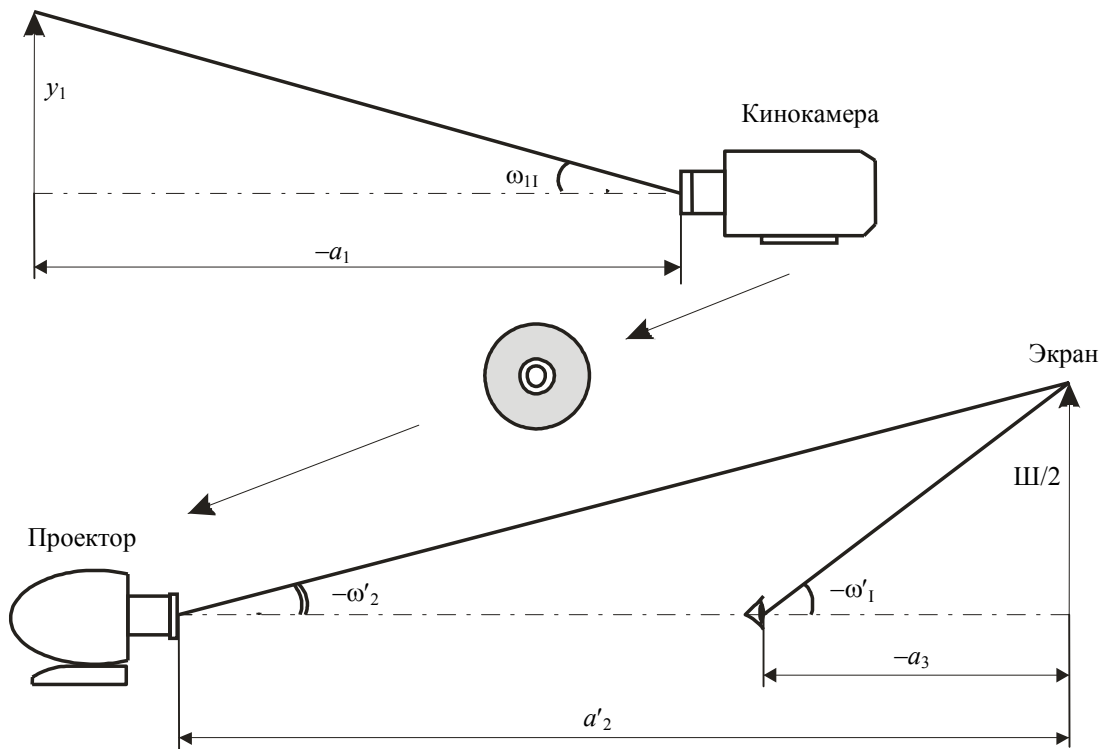


Рис. 2

Угловое поле объектива в пространстве предмета $2\omega_{II}$ находится из формулы

$$\text{tg} \omega_{II} = -\frac{\text{Ш}}{2\beta a_1},$$

а во втором сечении $2\omega_{1II}$ находится соответственно

$$\text{tg} \omega_{1II} = -\frac{\text{В}}{2\beta_2 a_1}.$$

Диафрагменное число k , которое также является основной характеристикой фотографических объективов, можно рассчитать через диаметр диска Эри и длину волны λ [10]:

$$k = \frac{d_э}{2,44\lambda}.$$

Исходя из предельной частоты Найквиста целесообразно, чтобы пятно рассеяния от отдельной точки предмета распределялось как минимум на площадке 2×2 элемента матрицы. Полученные значения диафрагменного числа не учитывают соответствия энергетическим

характеристикам светочувствительной матрицы. Для работы с малыми уровнями освещенности необходимо увеличение относительного отверстия.

Были рассчитаны основные характеристики киносъёмочных объективов, в качестве приемника оптического излучения использующих CMOS-матрицу Dунатах 35 Ultra [14], которые приведены в табл. 3 ($k=4,5$). Для расчетов было принято, что на следующем этапе формирования изображения используется проектор с D-ILA-матрицей 1,27 дюйма, а минимальная дистанция киносъёмки — $a_1 = 0,5$ м. Как видно из табл. 3, значения фокусных расстояний, угловых полей объективов для разных залов различаются несущественно и зависят в основном от кинематографического формата.

Таблица 3

Параметр	Вместимость зала, мест											
	2050				850				250			
	Кинематографический формат											
	1,37:1	1,85:1	2,35:1	1,78:1	1,37:1	1,85:1	2,35:1	1,78:1	1,37:1	1,85:1	2,35:1	1,78:1
f_{Imin} (f_{IImin}), мм	33,69	25,39	20,21 (27,41)	26,34	33,69	25,42	19,96 (27,41)	26,34	29,93	22,51	17,89 (24,31)	23,36
f_{Imax} (f_{IImax}), мм	36,10	26,73	21,04 (29,0)	27,78	36,1	26,76	20,77 (29,0)	27,78	31,8	23,56	18,55 (25,53)	24,48
$2\omega_1$ ($2\omega_{\text{III}}$), ...°	32	42	52 (23)	41	32	42	53 (23)	41	36	48	58 (26)	46

Из всего выше сказанного можно заключить, что при определении основных характеристик оптических систем цифрового кинематографа следует исходить как из габаритных соотношений максимальных размеров предмета и изображения, так и из требуемого качества изображения на киноэкране. Для обеспечения изображения высокого качества при проекции зритель не должен различать пиксельную структуру изображения в виде наложенной на него сетки. Расчеты подтвердили, что требованиям цифрового кинематографа удовлетворяют оптические системы с разрешающей способностью 2К и выше. Однако для создания (и показа) широкоэкранных фильмов нужно использовать технику на основе матриц с разрешающей способностью 4К (4096/2160 пикселей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сравнение электронного и традиционного кинематографа [Электронный ресурс]: <http://www.era-tv.ru/catalogueEC/1_1_2.asp>.
2. Комар В. Г. Перспективы развития электронного цифрового и пленочного кинематографа // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. 2003. № 2. С. 54—56.
3. Никаноров И. Цифровой кинематограф // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. 2003. № 2. С. 57—60.
4. Блохин А., Винокур А., Елагина М. HDTV и кинематограф // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. 2005. № 2. С. 52—54.
5. Семичастная В. НТК Современные технологии в кинематографе // Киномеханик. Новые фильмы. 2006. № 6. С. 13—19.
6. DLP Discovery 4000 [Electronic resource]: <http://www.dlp.com/regional/dlp_discovery/pdfs/DLP_Discovery_4000_2009.pdf>.
7. New Lineup of Proprietary D-ILA High-definition Reflective Liquid Crystal Devices [Electronic resource]: <http://www.jvc-victor.co.jp/english/press/2007/1-27_4k2k.pdf>.
8. ОСТ 19-154-2000. Кинотеатры и киноустановки. Технологические параметры зрительных залов. Введ. 01.05.2001.
9. SMPTE EG 18-1994. Design of Effective Cine Theaters. March, 1994.
10. Родионов С. А. Основы оптики. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 167 с.

11. *Волосов Д. С.* Фотографическая оптика: Теория, основы проектирования, оптические характеристики. М.: Искусство, 1978. 543 с.
12. *Волков В. В., Горбань А. И., Джалиашивили О. А.* Клиническая визо- и рефрактометрия. Л.: Медицина, 1976. 216 с.
13. *Шрёдер Г., Трайбер Х.* Техническая оптика. М.: Техносфера, 2006. 424 с.
14. Dynamax 35 Ultra [Electronic resource]: <http://www.panavisionimaging.com/PDF/PB0005_041608.pdf>.

Сведения об авторах

- Лев Николаевич Андреев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики
- Алексей Валентинович Бахолдин** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru
- Юлия Константиновна Пруненко** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: prunenکو_sju@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
22.06.09 г.