

О.В. Рожков, А.Ф. Ширанков

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СУПЕРЗУМА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ВИДЕОКАМЕРЫ

Рассмотрены особенности разработки оптической системы специализированного трансфокатора для малогабаритной ($L \leq 173$ мм) профессиональной видеокамеры (Full HD). Показано, что возможно достижение почти дифракционного качества изображения во всем диапазоне перепада фокусных расстояний ($\sim 50^\times$) при четырех подвижках компонентов трансфокатора, работающего совместно с основным объективом с телецентрическим ходом лучей.

E-mail: ashirankov@bmsu.ru

Ключевые слова: трансфокатор, вариообъектив, частотно-контрастная характеристика, суперзум.

Введение. В последние несколько лет в продаже появились компактные любительские видеокамеры с большим перепадом фокусных расстояний ($40^\times \dots 70^\times$) на базе CCD с размером пиксела 1,7 мкм (и даже 1,4 мкм) [1]. Однако производители не публикуют данные о качестве формируемого ими изображения (особенно в промежуточных зум-позициях), что в значительной степени типично и для престижных фотозумов [2], хотя в последнем случае некоторые известные производители иногда приводят частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) в крайних (wide и tele) положениях. Отличием является одна из последних публикаций по суперзумам [3], где приведены ЧКХ для четырех зум-позиций, однако три из них — длиннофокусные. Этого, однако, явно недостаточно для уверенной оценки качества изображения во всем диапазоне зуммирования — по крайней мере при профессиональной видеосъемке «наездом».

В этом аспекте представляет несомненный практический интерес исследование предельно возможных технических характеристик оптических систем данного класса расчетным путем и выявление основных ограничений при их разработке. Для решения поставленной задачи выбрана пятикомпонентная система суперзума с кратностью перепада фокусных расстояний 47^\times и максимальным углом поля зрения $2\omega = 75^\circ$. При этом с целью достижения предельных значений ЧКХ и минимизации дисторсии все четыре компонента трансфокатора, расположенные перед основным объективом, выполнены подвижными.

Назначение подвижных компонентов можно интерпретировать следующим образом (рис. 1). Головной компонент — типовая поло-

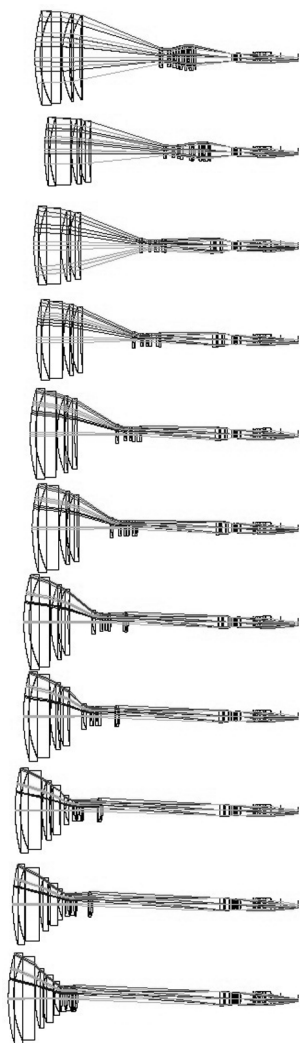


Рис. 1. Оптическая система исследованного суперзума в 11 положениях — от самой узкопольной (вверху) до самой широкоугольной (внизу)

качества изображения в позициях wide-normal подвижка этой коррекционной склейки может быть ликвидирована.

Второй зуммирующий компонент является положительным, его «ход» занимает 1/3 свободного пространства трансфокатора; принципиальная схема последнего отличается от обычных упрощенных

жительная многолинзовая система, состоящая из трех кроновых линз с расположенным перед ними отрицательным мениском из тяжелого флинта для предахроматизации и некоторого развития поля зрения в широкоугольных (wide) зум-позициях. Он является одним из трех основных компонентов трансфокатора, образуя его наиболее габаритный компонент как в широкоугольных позициях ($w \leq \pm 37,5^\circ$) за счет развитого угла поля зрения, так и в супертелепозициях за счет большого диаметра входного зрачка.

Второй (по ходу лучей) отрицательный компонент, состоящий из трех отрицательных линз из тяжелых лантановых стекол и одной положительной из сверхтяжелого флинта, является первым зуммирующим компонентом трансфокатора. Его «ход» составляет почти 2/3 свободного пространства между головным компонентом и неподвижной апертурной диафрагмой основного объекта.

Для улучшения абберрационной коррекции совместно с этим основным отрицательным компонентом трансфокатора работает малоподвижная (по отношению к нему) двухлинзовая склейка, «саждающаяся» на последнюю (флинттовую) линзу отрицательного компонента в крайней сверхширокоугольной позиции, отскакивающая на 6...8 мм во всех позициях между superwide и normal и вновь почти касающаяся последней линзы отрицательного компонента во всех телепозициях. Эта склейка в качестве базового элемента содержит положительную линзу из легкого кронового стекла и слабый ахроматирующий мениск из тяжелого флинта. За счет некоторого ухудшения

систем [4, 5] лишь небольшой подвижкой головного компонента и наличием слабоподвижного компенсатора за отрицательным зуммирующим компонентом. Сам положительный зуммирующий компонент достаточно тривиален — он содержит три положительные линзы из легкого крона и отрицательный ахроматизирующий мениск из сверхтяжелого флинта, подклеенный к передней поверхности средней положительной линзы рассматриваемого компонента.

Основной объектив с расположенной непосредственно перед ним апертурной диафрагмой является наиболее сложным как с точки зрения числа линз, так и их расположения. Если слабо вынесенный входной зрачок является достаточно тривиальным, то работа этого двухкомпонентного («антиПетцваль») объектива в сходящихся пучках (т. е. как будто бы с мнимым предметом) встречается крайне редко. Нельзя не отметить телецентричность ($< 2^\circ$) выходных пучков (в плоскости изображения), что существенно упрощает микролинзовый растр ССД.

Первый компонент основного объектива является отрицательным (что в корне отличает рассматриваемую подсистему от широко известной схемы Петцваля) и состоит из двух ахроматизированных склеек, первая из которых двояковыпуклая, а вторая — толстый мениск с очень слабой силой (наружные радиусы почти равны). При этом в первой (силовой) отрицательной склейке вносится аномальный хроматизм положения (положительная линза из тяжелого флинта, а отрицательная — из тяжелого лантанового крона). Это же имеет место и во второй склейке — с той лишь разницей, что положительная линза здесь использует обычный флинт (а не тяжелый). Вследствие подобия обеих склеек их число может быть сокращено за счет некоторого ухудшения аберраций.

Второй (положительный) компонент основного объектива работает как у традиционного «Петцваля», однако содержит четыре субкомпонента (обычно их максимум два), два (внутренних) из которых являются склейками (первая из них в основном компенсирует хроматизм увеличения, а вторая — положения) и добавляют положительную силу к переднему апланатическому мениску и толстой двояковыпуклой задней линзе.

Некоторого упрощения второго компонента основного объектива можно достичь (за счет некоторого ухудшения аберраций) путем переноса силы первого мениска во вторую линзу первой склейки, а силы последней линзы — в первую линзу второй склейки с некоторым увеличением ее толщины.

Однако ни одна из указанных рекомендаций по упрощению системы пока не была опробована, так как основной целью данной работы было выявление (путем тщательной реоптимизации приведенной ранее в работе [1] исходной системы) предельно возможного качества изображения на примере малогабаритной Full HD видеока-

меры профессионального класса с пикселом 1,7 мкм, что требует диагонали кадра $2y'_{\max} \approx 4$ мм. При анализе полученных aberrаций показано, что вследствие дифракционных ограничений для разработки изделий данного класса использовать CCD с пикселом 1,4 мкм, и особенно 1,2 мкм, нецелесообразно, хотя при этом пропорционально сокращаются габариты и значительно вес камеры.

В результате глубокой реоптимизации (при сохранении основных входных требований по угловому полю ($w \leq \pm 37,5^\circ$) и перепаду фокусных расстояний ($\geq 47^\times$) при размере диагонали кадра $2y'_{\max} = 4$ мм) были получены значения параметров. В таблице приведены наихудшие значения ЧКХ (для пространственной частоты $\nu = 200 \text{ мм}^{-1}$): для синего ($\lambda = 486 \text{ нм}$), зеленого (546 нм), желтого (588 нм) и красного (656 нм) цветов с весовыми коэффициентами $B + G + Y + R = 0,5:1:1:0,5$, а также дисторсия (%), общая длина системы L_Σ , относительное отверстие $F\#$ и фокусное расстояние f' для 11 (более или менее равномерно расположенных) зум-позиций.

Значения ЧКХ для разных зум-позиций и углов поля зрения

	Суперширокоформатный		Широкоформатный	Нормальное поле		Портрет		Телепозиция		Супертелепозиция	
	$\pm 37,5$	± 35	$\pm 31,5$	± 25	$\pm 20,5$	± 15	$\pm 12,3$	± 8	$\pm 5,3$	$\pm 1,69$	$\pm 0,835$
$\pm w$, градус											
Poly	32	26	27	29	31	31	31	32	32	22	16,5
B	46	49	47	49	50	44	44	43	40	40	23,5
G	45	46	48	45	44	42	40	41	39	33	26,5
Y	45	42	43	42	43	41	39	37	38	33	27,5
R	38	42	37	35	35	32	29	25	26	22	22
Дисторсия, %	-7,9	-6,8	-3,3	+0,06	+1,7	+1,3	+1,6	+1,0	+0,7	+0,7	+0,9
L_Σ , мм	171	169	167,7	161,5	161,3	157,2	158,8	155,3	157,2	150,3	155,5
$F\#$	3,14	3,39	3,76	3,89	3,88	4,05	4,27	4,20	4,25	4,47	4,53
f' , мм	2,833	3,06	3,39	4,29	2,25	7,30	8,98	14,1	21,3	67,2	136,0

Для более наглядного представления на рис. 2 приведены зависимости наихудших значений ЧКХ от угла поля зрения. Видно, что система хорошо «выглажена», в результате чего разброс отдельных точек на графиках не превышает 1...2 %.

Наименее подвержена действию «недоисправленных» aberrаций и дифракции «синяя» (B) компонента ЧКХ, за ней следуют почти совпадающие «зеленые» (G) и «желтые» (Y) ЧКХ. Хорошо заметное отличие «красной» (R) компоненты ЧКХ указывает на суммарное отрицательное действие двух факторов: недостаточной оптимизации стекол и, главное, дифракции (рис. 3).

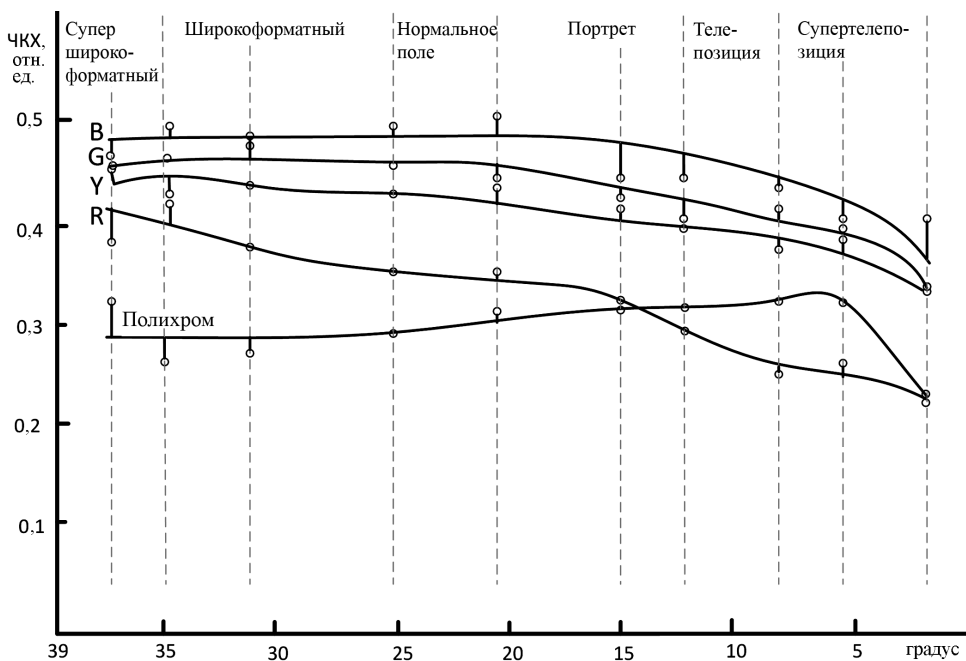


Рис. 2. Зависимости «цветных» компонент и полихроматической ЧКХ от угла поля зрения

Причем, если понижение «красных» (R) компонент ЧКХ свидетельствует в основном об отрицательном влиянии дифракции, то спад полихроматических ЧКХ до 28...35 % во всех позициях (кроме супертелепозиции) указывает на отрицательное влияние хроматизма увеличения. Для устранения недостаточно корректного выбора стекол следует провести их реоптимизацию, что, однако, требует как минимум многопроцессорного сервера и очень трудоемко.

С одной стороны, резкое нарастание «недоисправленной» бочкообразной дисторсии в сверхширокоугольной позиции до -8% препятствует дальнейшему развитию углового поля (сверх $2w = 75^\circ$) и ограничивает таким образом минимальное фокусное расстояние f'_{\min} ; к этому добавляется и малорациональное увеличение длины системы до 173 мм. С другой стороны, резкий спад ЧКХ в супертелепозиции из-за касания всех трех линз внутренних подвижных компонентов трансфокатора не позволяет увеличить максимальное фокусное расстояние $f'_{\max} \leq 136$ мм даже при диафрагменном числе $F\# = 4,5$. В результате полученная кратность изменения фокусных расстояний составляет лишь 48^x (2,83 мм/3,1...136 мм/4,7), но зато во всех 11 зум-позициях разрешение ограничивается в основном дифракцией.

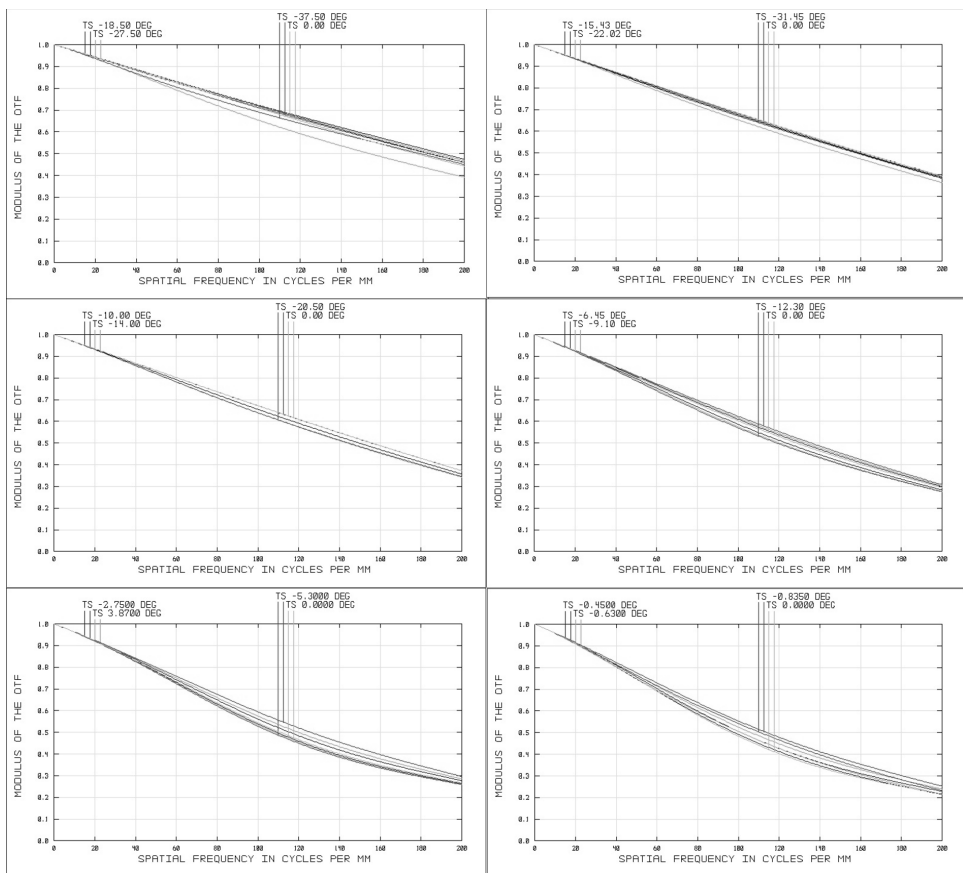


Рис. 3. «Красные» компоненты ЧКХ для всех нечетных зум-позиций — от самой широкоугольной (в левом верхнем углу) до самой узкоугольной (в правом нижнем углу)

Рассмотрим возможность улучшения данной системы путем использования CCD с размером пиксела 1,4 мкм (хотя из-за возрастания шумов при этом уже не будет обеспечено профессиональное качество ТВ-изображения). При такой модернизации прямо пропорционально уменьшаются габариты (наиболее заметна общая (суммарная) длина L_{Σ} системы до 142 мм) и волновые aberrации, которые достаточно малы и, соответственно, почти не ухудшают ЧКХ, так как последняя ограничивается в основном только дифракцией. Таким образом, из рассматриваемой системы может быть получен суперзум с еще меньшими габаритами, но уже непрофессионального класса (для продвинутых любителей), если на первое место выходит стоимость изготовления многолинзовой системы с прецизионной механикой.

Заключение. Рассмотрены особенности схмотехники и предельно достижимые параметры малогабаритного 48^x суперзума для

профессиональной видеокамеры. Показано, что при использовании CCD с размером пиксела 1,7 мкм качество изображения ограничено в основном дифракцией. Таким образом, системы данного класса не могут быть в настоящее время существенно уменьшены без дальнейшего снижения шумов малогабаритных CCD формата Full HD и применения асферик с целью развития относительного отверстия (светосилы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожков О. В., Ульченко Е. А. Вариообъектив с большим перепадом фокусных расстояний // Тр. IX Международной конференции «Прикладная Оптика–2010». – СПб., 2010. – Т. 3. – С. 321–325.
2. Leuhard R. Optics for Digital Photography // Proc. of SPIE. – 2010. – Vol. 6834, 68340w-1.
3. Sanson M. C. et al. MWIR Continuous Zoom with Large Zoom Range // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8012, 80122F.
4. Ширанков А. Ф., Вереникина Н. М., Рожков О. В. Сверхкомпактный трехкратный зум-объектив для малокадровой микровидеокамеры медицинского назначения // Сб. трудов 7-й науч.-техн. конф. «Медико-технические технологии на страже здоровья». «Медтех–2005». – 2005. – С. 166–169.
5. Ширанков А. Ф., Рожков О. В., Штыков С. А., Аниканов А. Г. Пат. US2009116119 «COMPACT ZOOM LENS». 07.09.2009.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012