

М. В. Чикирисов¹✉, Т. Н. Хацевич¹

Оценка хроматизма положения одиночной линзы и двухлинзового дублета в спектральном диапазоне 0,4–1,1 мкм

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: misha.chikirisov@mail.ru

Аннотация. Актуальность оценивания хроматизма положения для одиночной линзы и двухлинзового дублета определяется необходимостью оптимального синтеза исходных систем при оптическом проектировании объективов с расширенным рабочим спектральным диапазоном для телевизионных камер, работающих в режимах «день / ночь». Целью статьи является определение соотношения между значениями хроматизма положения изображения в оптических системах в спектральном диапазоне $F' - C'$ и в расширенном спектральном диапазоне 0,4 – 1,1 мкм. Исследование проводилось методами теории хроматизма и компьютерного проектирования оптических систем. Установлено, что отношение хроматизма положения в рассматриваемых диапазонах для одиночной линзы составляет от 2,8 до 3,1 (в среднем 2,9) в зависимости от марки материала линзы, для ахроматического дублета – колеблется от 7 до 11, при этом среднее значение составляет 9.

Ключевые слова: хроматизм положения, спектральный диапазон, средняя дисперсия, частная дисперсия

M. V. Chikirisov¹✉, T. N. Khatsevich¹

Estimation of the Chromaticity of the Position of a Single lens and a Double-Lens Doublet in the Spectral Range of 0,4–1,1 Microns

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: misha.chikirisov@mail.ru

Abstract. The relevance of assessing the chromaticity of the position for a single lens and a double-lens doublet is determined by the need for optimal synthesis of the initial systems in the optical design of lenses with an extended operating spectral range for television cameras operating in day/night modes. The purpose of the article is to determine the relationship between the chromaticity values of the image position in optical systems in the spectral range $F' - C'$ and in the extended spectral range of 0,4 – 1,1 microns. The research was carried out using the methods of chromatic theory and computer-aided design of optical systems. It was found that the ratio of position chromaticity in the examined ranges for a single lens range from 2,8 to 3,1 (on average 2.9), depending on the brand of lens material, for an achromatic doublet it ranges from 7 to 11, with the average value being 9.

Keywords: Chromaticity of position, spectral range, average variance, partial variance

Введение

Основным инженерным методом проектирования оптических систем современных оптико-электронных приборов является компьютерное проектирование с использованием программ по расчету оптических систем [1]. Важнейшим эта-

пом в процессе расчета оптических систем является этап создания исходной (стартовой) системы, которая на втором этапе подвергается оптимизации, то есть изменению конструктивных параметров таким образом, чтобы максимально приблизиться к требованиям, формулируемым разработчиком в целевых показателях оптимизационной функции. Эффективному оптимизации и оптического проектирования в целом во многом определяется возможностями, заложенными в исходной системе. На этапе выбора или синтеза исходной системы прежде всего учитывается возможность коррекции в изображении хроматических аберраций первого порядка. Теория хроматизма [2] дает математический аппарат для вычисления хроматизма положения и хроматизма увеличения изображения как одиночных оптических компонентов, так и систем, состоящих из нескольких компонентов. К условию ахроматизации часто добавляются дополнительные условия, например для устранения термооптической аберрации положения [3, 4], для работы в двух спектральных диапазонах [5] и др.

В оптико-электронных приборах спектральный диапазон работы объектива определяется спектральной характеристикой приемника излучений, с которым он сопрягается, с учетом светофильтров, используемых в приборе. Спектральный диапазон работы современных матричных приемников излучений, используемых в телевизионных оптико-электронных приборах, составляет от 0,4 до 1,1 мкм [6], то есть он превышает спектральный диапазон чувствительности человеческого глаза. Поэтому в телевизионных камерах перед приемником могут устанавливаться светофильтры или наносится соответствующие покрытия на оптические поверхности объектива, отсекающие инфракрасное излучение, соответствующее участку инфракрасной чувствительности приемника излучений. В визуальных наблюдательных оптических системах, в которых изображение рассматривается глазом наблюдателя, в качестве рабочего спектрального диапазона при расчете оптической системы объектива, используется диапазон от 0,48 до 0,64 мкм (между линиями $F' - C'$). Для того, чтобы в телевизионных камерах полностью использовать излучение, соответствующее спектральному диапазону чувствительности современных матричных приемников излучений, необходимо, чтобы объектив камеры обеспечивал качественное формирование изображения в расширенном спектральном диапазоне от 0,4 до 1,1 мкм. С учетом вышесказанного представляет интерес ответ на вопрос, каково соотношение между значениями хроматизма положения изображения в оптических системах в спектральном диапазоне $F' - C'$ и в расширенном спектральном диапазоне 0,4 – 1,1 мкм. Целью статьи и является поиск ответа на поставленный вопрос. Значимость (актуальность) такого знания определяется необходимостью оптимального синтеза исходных систем при оптическом проектировании объективов с расширенным рабочим спектральным диапазоном для телевизионных камер, работающих в режимах «день / ночь».

Методы и материалы

В теории хроматизма методы оценки хроматической аберрации положения изображения (хроматизма положения) базируются на дифференцировании инварианта Аббе для преломляющей поверхности по длине волны, определении зависимости отрезка s' от дисперсионных свойств материала и обобщении результатов на произвольное количество преломляющих поверхностей или компонентов в оптической системе [2, 7]. Провести сравнение хроматизма положения изображения в видимом спектральном диапазоне $F' - C'$ и в расширенном спектральном диапазоне 0,4 – 1,1 мкм наиболее просто можно для одиночной линзы, стоящей изображение предмета, находящегося в бесконечности. Теория хроматизма дает простую формулу для расчета:

$$\Delta S'_{\lambda_1\lambda_2} = -\frac{f'}{v_{\lambda_0}}, \quad (1)$$

где $\Delta S'_{\lambda_1\lambda_2}$ – хроматизм положения между изображениями бесконечно далекого предмета, построенными одиночной тонкой линзой, с помощью наименьшей λ_1 и наибольшей λ_2 длин волн рабочего спектрального диапазона; f' – фокусное расстояние линзы для основной длины волны λ_0 рабочего спектрального диапазона;

$v_{\lambda_0} = \frac{n_{\lambda_0} - 1}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}$ – коэффициент средней дисперсии материала линзы, при этом индекс при показателе преломления n соответствует указанным длинам волн.

В качестве основной длины волны в диапазоне $F' - C'$ использована линия e , в диапазоне 0,4–1,1 мкм – длина волны 0,75 мкм.

Используя каталог отечественных оптических стекол, содержащийся в широко используемой программе по компьютерному расчету оптических систем (zemax), были составлены диаграммы по принципу диаграммы Аббе для каждого из исследуемых спектральных диапазонов (рис.1), то есть определены положения морок стекол в системе координат «показатель преломления – коэффициент средней дисперсии». Сравнение диаграмм, приведенных на рис. 1 а и 1 б, показывает, что диапазоны изменения коэффициентов средней дисперсии исследуемых марок стекол существенно отличаются: для расширенного спектрального диапазона 0,4–1,1 мкм он примерно в три раза меньше, чем для видимого. В соответствии с формулой (1) хроматизм положения изображения, построенного одиночной линзой, обратно пропорционален коэффициенту средней дисперсии и будет увеличиваться при расширении рабочего спектрального диапазона.

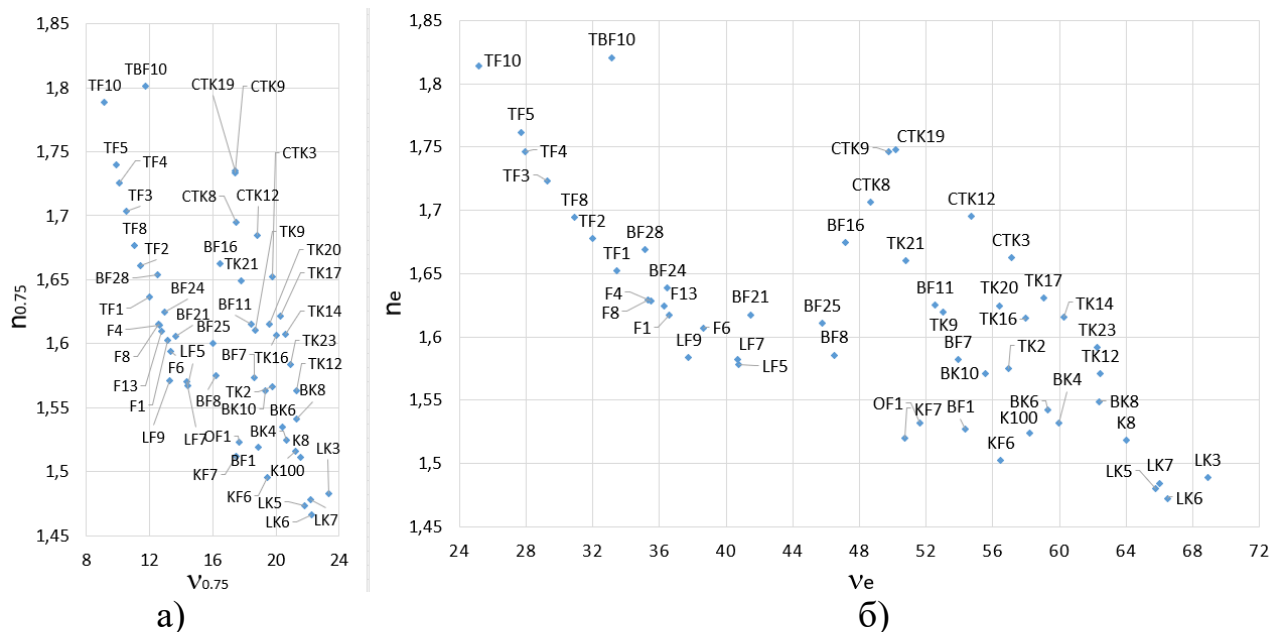


Рис. 1. Диаграммы «показатель преломления – коэффициент средней дисперсии» отечественных марок стекол для спектральных диапазонов: а) 0,4–1,1 мкм; б) $F' - C'$

В рамках учебной научно-исследовательской работы магистрантом были проведены расчеты хроматизма положения для одиночной линзы для 12 марок стекол, соответствующих различным группам оптических стекол, результаты которых приведены на рис. 2. Расчеты проводились как по формуле (1), так и путем прямой трассировки лучей соответствующего спектрального диапазона через линзу с фокусным расстоянием 100 мм. При этом отличие в результатах не превышало 3 %. На рис. 2 для каждой из марок материалов приведены значения хроматизма положения, выраженные в миллиметрах для каждого из диапазонов.

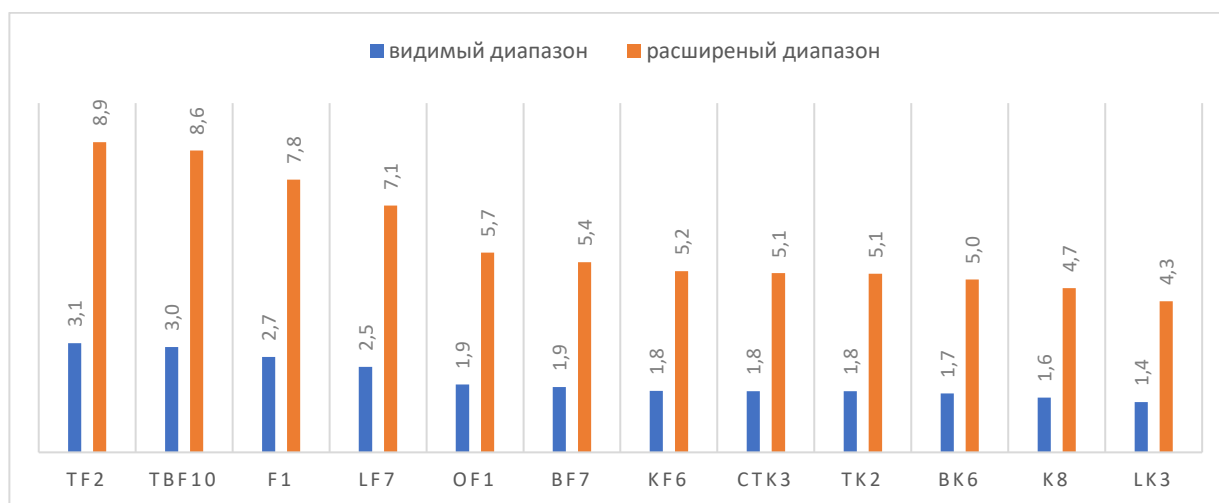
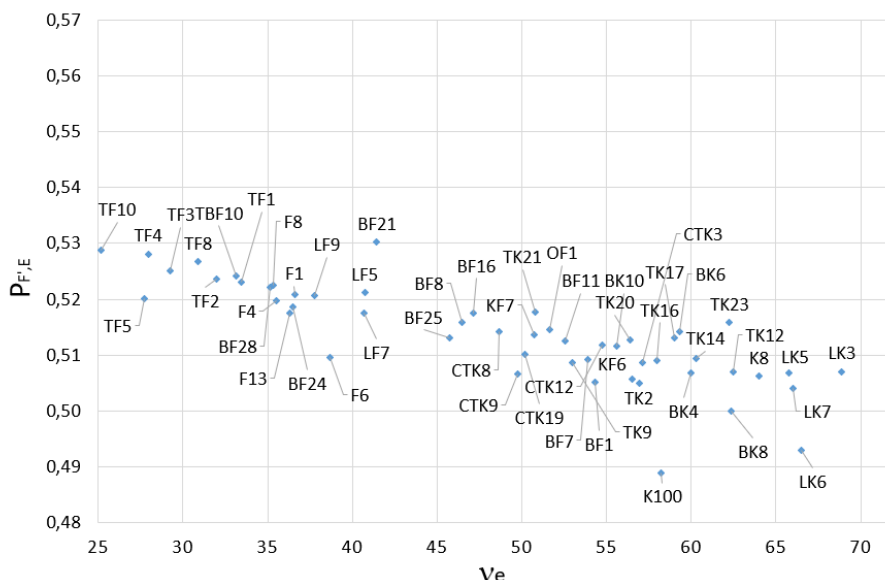


Рис. 2. Хроматизм положения одиночной линзы для двух диапазонов по результатам расчета хода лучей

Оценка хроматизма положения в оптической системе, состоящей из двух склеенных линз, проведена на примере ахроматического склеенного дублета. В теории хроматизма показано, что чем больше абсолютная разность коэффициентов средней дисперсии, тем меньше абсолютное значение оптических сил в склеенном компоненте. Последнее является благоприятным для коррекции aberrаций широких пучков лучей, прежде всего сферической aberrации. Остаточный хроматизм (вторичный спектр) $\Delta S'_{\lambda 1 \lambda 0}$ в изображении, построенном ахроматическим дублетом для бесконечно удаленного предмета, рассчитывается по формуле [7]:

где $p_1 = \frac{n_{\lambda 11} - n_{\lambda 01}}{v_{\lambda 11} - v_{\lambda 21}}$ и $p_2 = \frac{n_{\lambda 12} - n_{\lambda 02}}{v_{\lambda 12} - v_{\lambda 22}}$ – коэффициенты частной дисперсии для материала соответственно первой и второй линз склеенного дублета; v_1, v_2 – коэффициенты средней дисперсии материала соответственно первой и второй линз склеенного дублета.



223

нов: а) 0,4–1,1 мкм; б) $F' - C'$

Сравнение диаграмм, представленных на рис. 3 а и 3 б, показывает, что в спектральном диапазоне 0,4–1,1 мкм примерно в три раза возрастает различие в значениях коэффициентов частных дисперсий, что в совокупности с уменьшением диапазона коэффициентов средних дисперсий приводит к возрастанию хроматических aberrаций в двухлинзовом дублете в диапазоне 0,4–1,1 мкм по сравнению с видимым спектральным диапазоном. Результаты количественной оценки хроматизма положения в исследуемых диапазонах приводятся в следующем разделе.

Результаты и обсуждение

Оценка вторичного спектра в ахроматическом склеенном дублете проводилась по формуле (2) для 30 комбинаций марок материалов. В качестве примера в табл. 1 представлены результаты расчетов для пяти из них.

Таблица 1 – Сравнение хроматизма положения в склеенном дублете в видимом диапазоне и диапазоне 0,4–1,1 мкм

Комбинация марок	Видимый диапазон $F' - C'$			Расширенный диапазон 0,4–1,1 мкм			Отношение
	p_1 p_2	v_1 v_2	$-1/\text{tg } \gamma$	p_1 p_2	v_1 v_2	$-1/\text{tg } \gamma$	
ТФ2 ТК21	0,524 0,5142	31,963 50,7559	1903	0,8297 0,8059	11,4388 17,816	268	7,1
ТФ4 БК8	0,5271 0,5068	27,94 59,95	1572	0,8366 0,7856	10,07 20,67	207	7,6
ТФ8 ЛК7	0,5267 0,5041	30,903 66,022	1554	0,8304 0,7668	11,057 22,215	176	8,8
ТФ5 ЛК3	0,5275 0,5038	27,31 69,5	1778	0,8379 0,765	9,86 23,3397	185	9,6
БФ25 ТК14	0,5165 0,5086	45,787 60,199	1827	0,8097 0,7839	16,068 20,636	177	10,3

В табл.1 использовано обозначение $\text{tg} \gamma = \frac{p_1 - p_2}{v_1 - v_2}$, определяющее угол наклона прямой, соединяющей две марки стекол склеенного дублета на диаграммах, приведенных на рис.3 а и 3 б в каждом из исследуемых спектральных диапазонов. В этом случае значение коэффициента $\frac{-1}{\text{tg} \gamma}$ характеризует, какую часть от фокусного расстояния составляет хроматизм положения в склеенном дублете. Последний столбец в табл.1 определяет отношение хроматизма положения в диапазоне 0,4–1,1 мкм к хроматизму положения в видимом диапазоне.

Обобщая результаты по 30 комбинациям материалов, отмечается, что отношение хроматизма положения в рассматриваемых диапазонах для ахроматического дублета колеблется от 7 до 11, при этом среднее значение составляет 9.

В качестве примера на рис. 4 приведен график хроматизма положения в двухлинзовом дублете, смоделированном из марок стекол ТФ4-БК8 (вторая строка в табл. 1). Оптические силы линз в дублете рассчитывались так, чтобы в изображении был устранен хроматизм положения для длин волн 0,4 и 1,1 мкм, а фокусное расстояние равнялось 100 мм. Расчет, выполненный в компьютерной программе по расчету оптических систем, показал, что остаточный хроматизм положения в диапазоне 0,4-1,1 мкм в 7,2 раза больше, чем в видимом диапазоне. Можно принять, что относительная погрешность найденного соотношения (7–10 раз) не превышает 10 %.

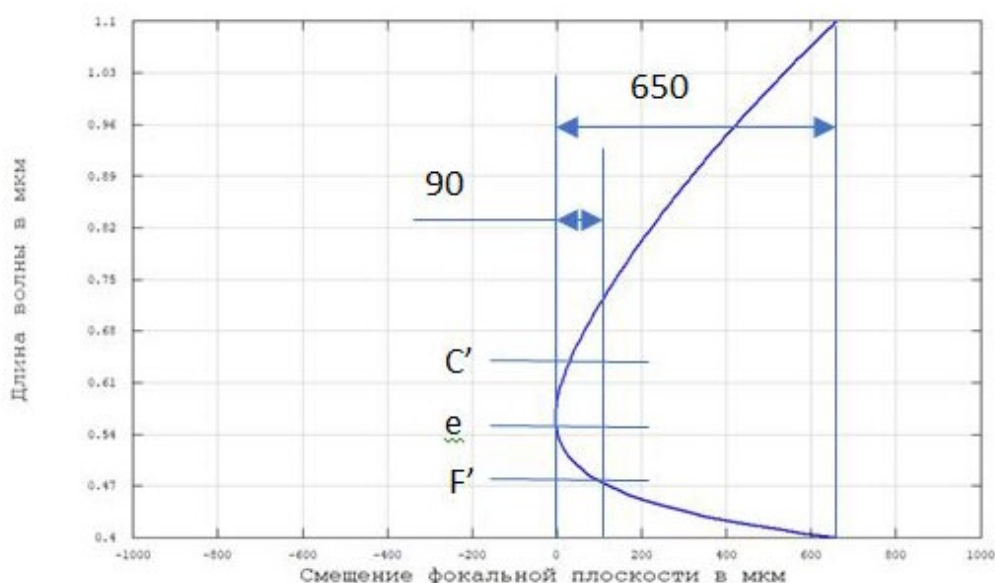


Рис.4. Хроматизм положения дублета из марок ТФ4-БК8

Для сравнения полученного результата с имеющими в литературе выбрана работа [8], посвященная особенностям вторичного спектра объективов коллиматоров, работающих в диапазоне длин волн 400—900 нм, авторы которой отмечают, что «при использовании комбинаций «обычных» стекол в спектральном диапазоне 400–900 нм происходит увеличение вторичного спектра в 7,5 раз по сравнению со спектральным диапазоном 480–643,8 нм». При расширении спектрального диапазона по сравнению с диапазоном, использованным для анализа в [8], ожидаемо должно получиться большее увеличение хроматизма положения. Найденное в данной работе среднее значение 9 может рассматриваться как коэффициент, характеризующий соотношение между хроматизмом положения в изображении ахроматического двухлинзового дублета в спектральном диапазоне 0,4-1,1 мкм и в видимом диапазоне 0,48–0,6438 мкм. В зависимости от комбинаций марок материалов значение коэффициента может составлять от 7 до 11.

Заключение

На основании вышеизложенного, можно утверждать, что соотношение между значениями хроматизма положения изображения в расширенном спектральном диапазоне 0,4 – 1,1 мкм по сравнению с таковым в спектральном диапазоне 0,48 – 0,6438 мкм составляет:

– в одиночных линзах от 2,8 до 3,1 (в среднем 2,9) в зависимости от марки материала линзы;

– в ахроматических линзовых дублетах от 7 до 11 (в среднем 9) в зависимости от использованных марок материалов.

Знание такой зависимости может быть полезным на этапе синтезе исходных оптических систем в процессе оптического проектирования объективов с расширенным рабочим спектральным диапазоном для телевизионных камер, работающих в режимах «день / ночь».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хацевич Т. Н. Компьютерные методы проектирования оптических систем: учебник / Т. Н. Хацевич. – Новосибирск: СГУГиТ, 2022 – 156 с.
2. Чуриловский, В. Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка / В. Н. Чуриловский — Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1968. — 312 с.
3. Романова Г. Э. Исследование aberrационных свойств и возможности пассивной атермализации оптических систем, работающих в области 8–12 мкм систем / Г. Э. Романова, Г. Пысь // ГЕО Сибирь, Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015»: сб. материалов в 3 т. Т. 2. – 2015. – С. 10-17.
4. Khatsevich T., Druzhkin E. Passive athermalization of optical systems for thermal devices // Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 119160J (15 December 2021); doi: 10.1117/12.2601732.
5. Khatsevich T., Shmelev E., Development of dual-band infrared lenses // Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 127800N (17 October 2023); doi: 10.1117/12.2689347.
6. FRAME e-shop theme [Электронный ресурс] / URL: <https://kit-frame.ru/imx482-tehnicheskie-vozmozhnosti-sravnenie-harakteristik> (дата обращения 26.04.2026)
7. Зверев. В. А. Оптические материалы. Часть 1. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. / В. А. Зверев, Е. В. Кривоустова, Т. В. Точилина. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2009. – 244 с.
8. Грамматин А. П. Особенности вторичного спектра объективов коллиматоров, работающих в диапазоне длин волн 400-900 нм / А. П. Грамматин, Е. А. Цыганок // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т.54, №9. – С. 75-77.

© М. В. Чикирисов, Т. Н. Хацевич, 2026