

УДК 535.015

Исследование "толстой" изопланатической базовой линзы с осевым распределением показателя преломления

А. Е. Алимов, Т. С. Ровенская

Представлены результаты исследования синтеза "толстой" базовой изопланатической линзы со сферическими поверхностями из материала с линейным осевым распределением показателя преломления. Исследованы и систематизированы абберационные свойства и конструктивные параметры таких линз.

PACS: 42.15.Fr, 42.79.Ry

Ключевые слова: абберационные свойства, градиентные оптические элементы, изопланатическая линза.

Введение

Композиционные методы [1, 2], приоритетная роль в разработке которых принадлежит проф. М. М. Русинову [2], являются важнейшей группой методов структурного синтеза, позволяющих создавать принципиально новые схемные решения. В работах М. М. Русинова создана архитектура оптических систем, которая может служить фундаментом при разработке объективов различного назначения. Основой этой архитектуры стали простейшие базовые элементы, создающие положительную оптическую силу и свободные от определенных аббераций. Эти базовые элементы представляют собой одиночные линзы из однородных материалов, расположенные в воздухе и ограниченные двумя преломляющими сферическими поверхностями. При построении оптических систем из таких элементов можно получить всю систему, также свободную от этих же аббераций. При этом структурная схема синтезируемой оптической системы существенно предопределяется выбором типа базовой линзы. Таким образом, развитие принципов структурного синтеза с использованием композиционных методов тесно связано с задачей всестороннего изучения абберационных характеристик и коррекционных возможностей оптических элементов различных типов и их комбинаций.

В связи с расширяющимся в настоящее время применением градиентных оптических элементов возникает закономерный интерес к исследованию параксиальных и абберационных свойств таких элементов, в частности, в целях анализа возможности их эффективного использования в качестве базовых линз объективов.

В данной работе рассмотрена "толстая" базовая изопланатическая линза с осевым линейным распределением показателя преломления (ОЛРПП), т. е. базовая линза с исправленными в области аббераций третьего порядка комой и астигматизмом, фокусное расстояние которой сравнимо по величине с толщиной по оси. Это позволяет дополнить ранее проведенное исследование [1], предметом которого являлась "тонкая" базовая изопланатическая линза с ОЛРПП, т. е. базовая линза с исправленными в области аббераций третьего порядка комой и астигматизмом, фокусное расстояние которой значительно превышает ее толщину по оси.

Условия синтеза "толстой" базовой изопланатической линзы с ОЛРПП

На рис. 1 представлена одиночная линза со сферическими поверхностями из материала с ОЛРПП, которое задано линейной зависимостью вида $n = n_0 + n_1 z$ в пределах всей осевой толщины d линзы, где n_0 , n_1 — коэффициенты ОЛРПП, $0 \leq z \leq d$ — расстояние вдоль оси Z (мм). Такая линза при расположении предмета в бесконечности имеет шесть параметров: r_1 , r_2 — радиусы кривизны, d — толщина по оси, s_p — удаление входного зрачка, n_0 , n_1 — коэффициенты ОЛРПП.

Исходными данными для синтеза были приняты коэффициенты ОЛРПП n_0 , n_1 и толщина линзы по оси d . Определяемыми в процессе синтеза изопланатической линзы параметрами являются радиусы кривизны r_1 , r_2 и удаление входного зрачка S_p .

Алимов Андрей Евгеньевич, ведущий инженер.
Московский научно-исследовательский телевизионный институт.
Россия, 105094, Москва, ул. Гольяновская, 7а, стр. 1.
Тел. (495) 460-03-77. E-mail: deminox@yandex.ru
Ровенская Тамара Сергеевна, доцент.
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.
Тел. (499) 263-62-47.

Статья поступила 3 октября 2010 г.

© Алимов А. Е., Ровенская Т. С., 2011

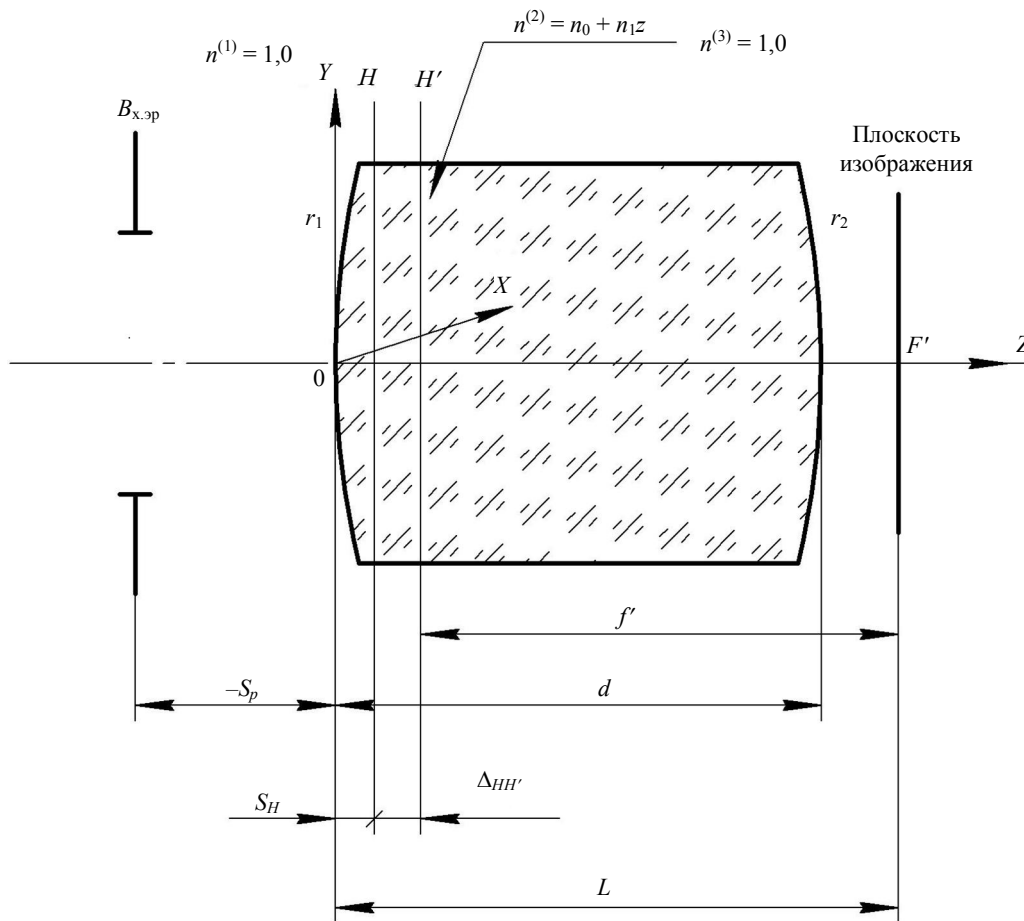


Рис. 1. Линза со сферическими поверхностями из градиентного материала с ОЛРПП

Анализ математических соотношений, выполняющихся при синтезе в области аббераций третьего порядка, на основе представленных в работе проф. М. М. Русинова [2] однородных "толстых" базовых изопланатических линз Б(кк), Б(ко), Б(кб), Б(ка) (рис. 2) позволил выявить универсальное соотношение, которое является необходимым для получения всех этих типов решений:

$$d = f' n. \tag{1}$$

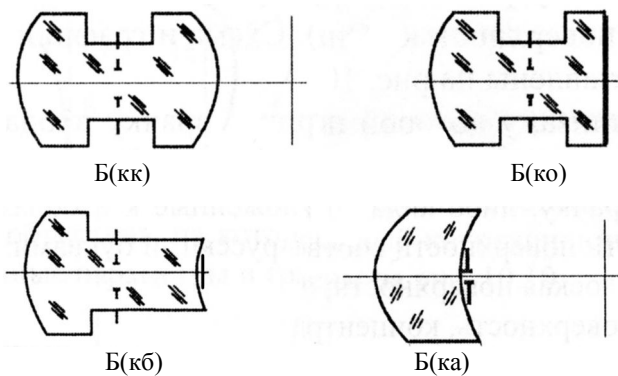


Рис. 2. Однородные "толстые" базовые изопланатические линзы

Таким образом, в целях обеспечения наиболее широкой области решений для "толстых" базовых изопланатических линз с ОЛРПП исходные данные для их синтеза выбирались на основании условия (1). Для численного исследования осевая толщина была принята равной 10 мм. Коэффициент n_0 был выбран равным 1,6126, а n_1 изменялся в области от $-0,02$ до $0,02 \text{ мм}^{-1}$, обеспечивая положительные и отрицательные перепады показателя преломления. Такой набор исходных параметров позволяет ограничить выбор материалов линзы оптическими стеклами и пластмассами, показатели преломления которых лежат в области значений от 1,4 до 2,0, а также обеспечить высокий, но технологически достижимый в настоящее время перепад показателя преломления $\pm 0,2$. Следовательно, в соответствии с условием (1) фокусное расстояние линз было принято равным 6,2 мм.

В рамках теории аббераций третьего порядка для синтеза изопланатической линзы необходимо обеспечить равенство нулю второго \bar{S}_{II} и третьего \bar{S}_{III} коэффициентов Зейделя. Эти абберационные условия дополнены условием обеспечения заданного значения фокусного расстояния.

Таким образом, процесс синтеза сводится к поиску аналитического решения системы из трех нелинейных уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} \bar{S}_{II}(r_1, r_2, s_p) = 0; \\ \bar{S}_{III}(r_1, r_2, s_p) = 0; \\ f'(r_1, r_2) = 6, 2. \end{cases} \quad (2)$$

При этом для коэффициентов \bar{S}_{II} и \bar{S}_{III} использовалась следующая нормировка первого и второго вспомогательных лучей:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = 0, \quad \bar{h}_1 = 1, \quad \alpha_3 = 1; \\ \beta_1 = 1, \quad \bar{H}_1 = \frac{s_p}{f'}, \quad I = -1. \end{aligned} \quad (3)$$

Все полученные в результате синтеза "толстые" базовые изопланатические линзы можно разделить на две группы.

В первую группу объединены решения, которые по своим абберационным свойствам являются развитием "тонких" базовых изопланатических линз семейств № 1 и 2 при значительном увеличении их осевой толщины [1].

Во вторую группу выделены решения, которые при равенстве коэффициента n_1 нулю (вырождение градиентной линзы в линзу с постоянным показателем преломления, равным n_0) соответствуют известным по классификации М. М. Русинова типам

"толстых" базовых изопланатических линз: Б(ка), Б(кк), Б(ко), Б(кб). В данной работе подробно рассмотрены линзы второй группы.

Исследование абберационных свойств "толстых" базовых изопланатических линз второй группы

"Толстые" базовые изопланатические решения с ОЛРПП второй группы представляют собой двояковыпуклые линзы с входным зрачком, расположенным за первой поверхностью в пределах осевой толщины линзы (рис. 3). Для решений с $n_1 < 0$ выполняется соотношение $|r_1| > |r_2|$; при $n_1 > 0$ существуют линзы с обратным соотношением радиусов $|r_1| < |r_2|$.

Характерной особенностью всех "толстых" базовых изопланатических линз с ОЛРПП является отличный от нуля положительный по величине задний фокальный отрезок. Данное обстоятельство расширяет возможности практического применения "толстых" изопланатических линз с ОЛРПП по сравнению с однородными типами Б(ко), Б(кб), у которых $s'_{F'} = 0$ мм. Относительно типов Б(ка) и Б(кк) градиентные линзы могут иметь как больший, так и меньший по величине задний фокальный отрезок и, соответственно, либо большую, либо меньшую длину L . Также среди градиентных линз могут быть получены решения с реверсивным расположением главных плоскостей, что объединяет их с однородной линзой Б(ка).

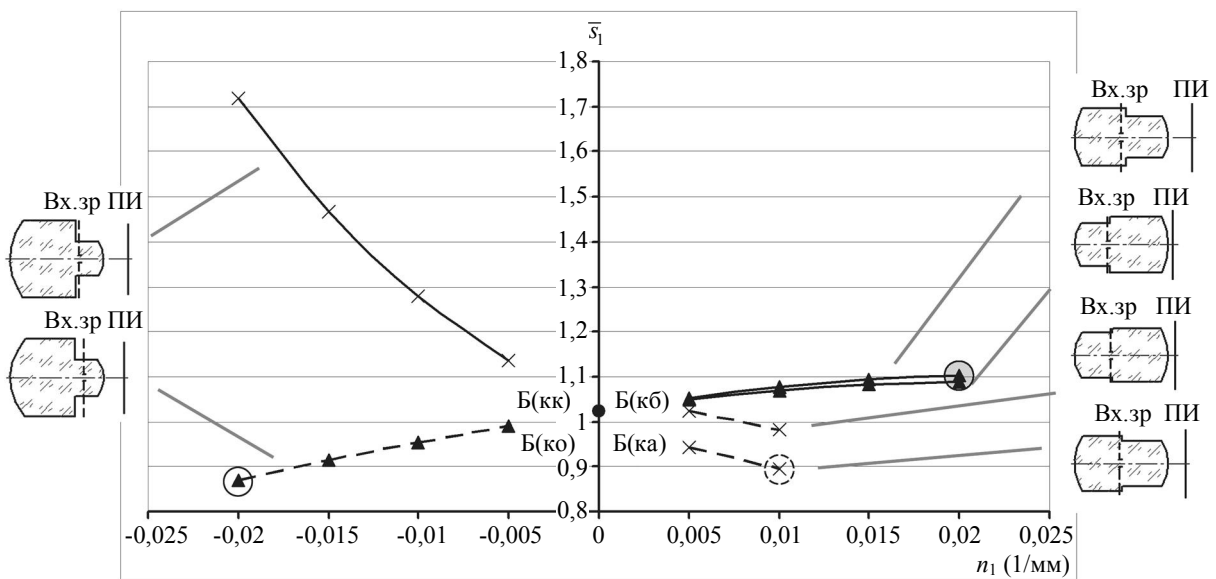


Рис. 3. Значения первого нормированного коэффициента Зейделя "толстых" изопланатических линз второй группы в зависимости от коэффициента n_1 :

○ — градиентная линза № 1; ⊙ — градиентная линза № 2; ● — градиентная линза № 3

Область значений первого коэффициента Зейделя "толстых" базовых изопланатических линз второй группы представлена на рис. 3. Все четыре типа однородных "толстых" изопланатических линз характеризуются одним значением $\bar{S}_1 = 1,0247$ (показаны точкой на оси ординат \bar{S}_1); при этом градиентные решения обеспечивают как большие, так и меньшие (выделены пунктиром) значения. Минимальное $\bar{S}_1 = 0,8704$ достигается при $n_1 = -0,02 \text{ мм}^{-1}$.

Значения четвертого коэффициента Зейделя градиентных линз (рис. 4) находятся в диапазоне

$\bar{S}_{IV} \in (0,88; 1,21)$, что больше, чем у типов Б(кб), Б(ко), но меньше, чем у типа Б(ка) однородных линз. Также можно отметить, что градиентные линзы позволяют обеспечить меньший \bar{S}_{IV} , чем однородные линзы типа Б(кк) (выделено пунктиром).

Пятый коэффициент Зейделя "толстых" изопланатических линз с ОЛРПП второй группы (рис. 5) находится в интервале $(-0,3; 0,4)$: $\bar{S}_V > 0$ при $n_1 < 0$, $\bar{S}_V < 0$ при $n_1 > 0$. Градиентные решения обеспечивают меньшие абсолютные значения пятого коэффициента Зейделя, чем однородные линзы типов Б(ка) и Б(кб).

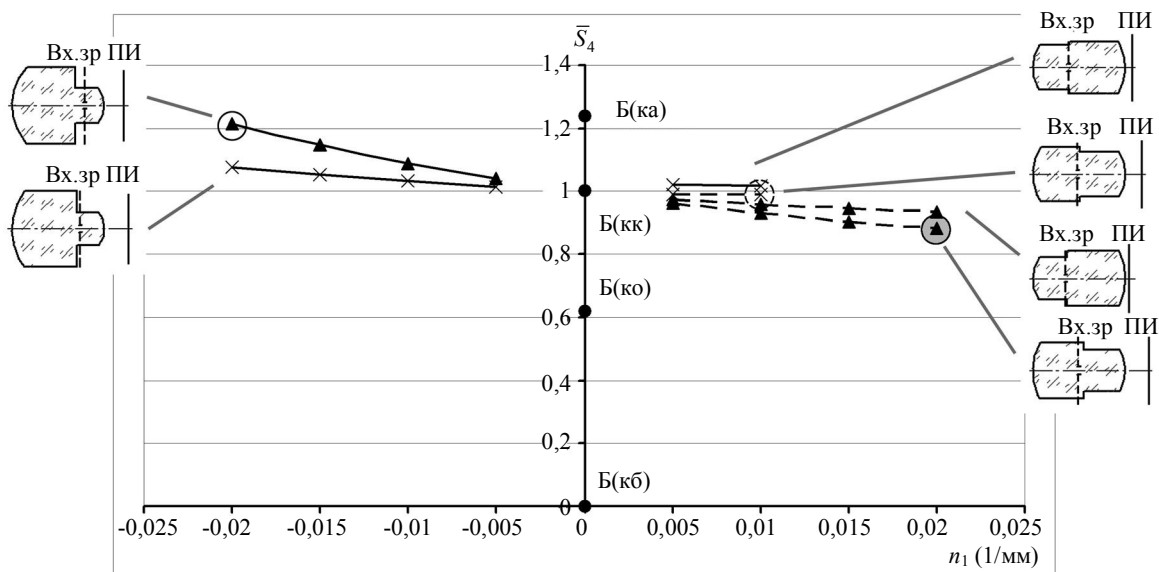


Рис. 4. Значения четвертого нормированного коэффициента Зейделя "толстых" изопланатических линз второй группы в зависимости от коэффициента n_1 :

\circ — градиентная линза № 1; \odot — градиентная линза № 2; \bullet — градиентная линза № 3

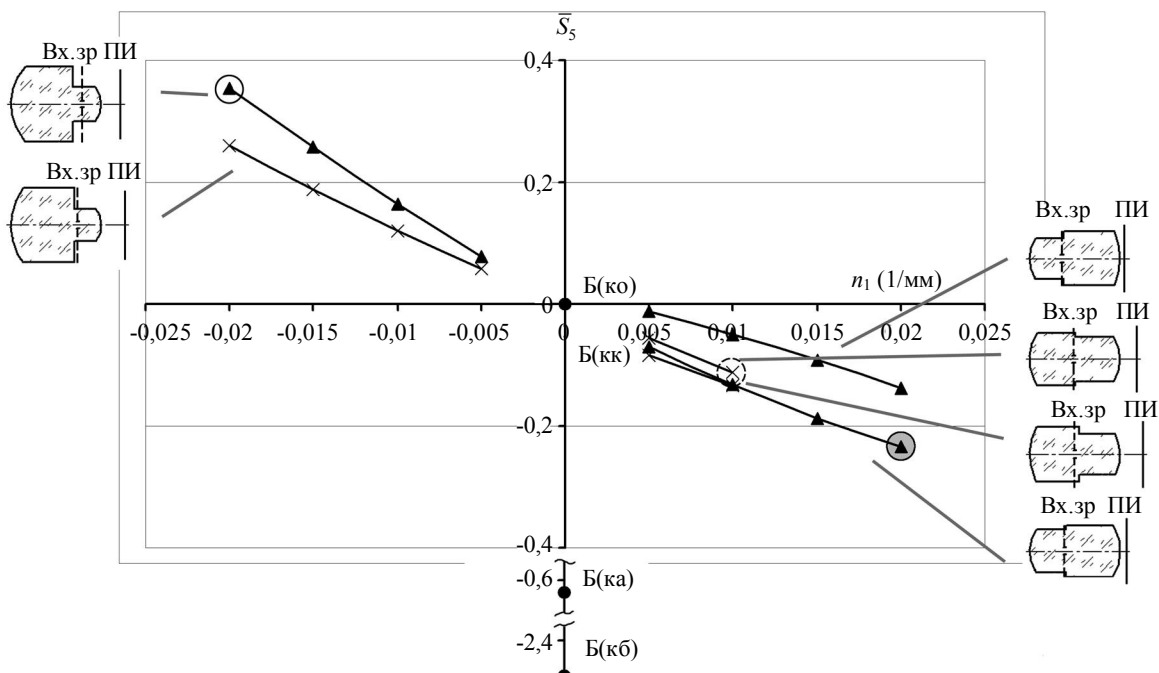


Рис. 5. Значения пятого нормированного коэффициента Зейделя "толстых" изопланатических линз второй группы в зависимости от коэффициента n_1 :

\circ — градиентная линза № 1; \odot — градиентная линза № 2; \bullet — градиентная линза № 3

Таким образом, использование "толстых" базовых изопланатических линз с ОЛРПП позволяет получить меньшие значения коэффициента Зейделя: сферической aberrации относительно Б(ка), Б(кк), Б(ко), Б(кб);

кривизны Петцваля относительно Б(ка), Б(кк);
дисторсии относительно Б(ка), Б(кб).

Вопрос влияния aberrаций высшего порядка в "толстых" базовых изопланатических линзах второй группы рассмотрен на примере линз, форма и значения коэффициентов Зейделя которых показаны на рис. 3—5. При этом:

градиентная линза № 1 обладает наименьшим значением \bar{S}_I в области отрицательных значений коэффициента ОЛРПП n_1 ;

градиентная линза № 2 обладает наименьшим значением \bar{S}_I в области положительных значений коэффициента ОЛРПП n_1 ;

градиентная линза № 3 обладает наименьшим значением \bar{S}_{IV} из всех градиентных решений.

В таблице представлены значения основных монохроматических aberrаций третьего порядка и соответствующих им реальных aberrаций, а также

aberrации среди всех приведенных в таблице линз;

градиентная линза № 2 по величине реальной поперечной сферической aberrации уступает лишь градиентной линзе № 1;

градиентная линза № 3 обладает наименьшим значением средней кривизны среди всех приведенных в таблице линз.

Наименьшая реальная меридиональная кома наблюдается среди неоднородных решений и соответствует градиентной линзе № 3. Наименьшая астигматическая разность среди неоднородных решений характерна для градиентной линзы № 2. В целом, для всех градиентных линз отступление от условия изопланатизма достаточно мало.

Значение ∂W в неоднородных решениях для большинства aberrаций не превышает 3—5 %; исключением является дисторсия, для которой максимальная $\partial W = 33\%$ наблюдается у градиентной линзы № 2. В однородных линзах ∂W для всех aberrаций, кроме дисторсии, не превышает 4,5 %; ∂W дисторсии у Б(ка) равна 12 %.

Аберрация	Порядок аберрации	Тип линзы				
		Б(ка)	Градиентная		Б(кк)	Градиентная № 3
			№ 1	№ 2		
Поперечная сферическая ($\Delta y'$)	3-й порядок, мм	-0,0147	-0,0125	-0,0129	-0,0147	-0,0158
	Реальная, мм	-0,0154	-0,0131	-0,0132	-0,0153	-0,0163
	∂W , %	4,5	5,1	2,3	3,9	3,1
Меридиональная кома ($\Delta y'_k$)	3-й порядок, мм	0	0	0	0	0
	Реальная, мм	0,0014	-0,0118	-0,0532	-0,0083	-0,0056
Астигматическая разность ($\Delta z'_a$)	3-й порядок, мм	0	0	0	0	0
	Реальная, мм	0,0528	0,0023	-0,0000	0,0000	0,0002
Средняя кривизна изображения ($\Delta z'_{кр}$)	3-й порядок, мм	-1,0543	-1,0321	-0,8414	-0,8501	-0,7501
	Реальная, мм	-1,0159	-0,9430	-0,8238	-0,8308	-0,7387
	∂W , %	3,8	9,4	2,1	2,3	1,5
Дисторсия ($\Delta y'_d$)	3-й порядок, %	-8,1	3,9	-1,3	0	-2,9
	Реальная, %	-9,2	5,8	-1,7	0	-3,5
	∂W , %	12,0	32,8	23,5	0	17,1

доля aberrаций высших порядков (∂W) данных линз. Для сравнения в таблице также приведены аналогичные aberrации типов Б(ка) и Б(кк) однородных линз. Расчет aberrаций проводился для края входного зрачка и края поля при $D/f' = 1:3$ и $2\omega = 60^\circ$.

Анализ данных таблицы показал, что между градиентными и однородными линзами наблюдается соотношение реальных aberrаций, аналогичное зависимостям, полученным в результате анализа в области третьего порядка, а именно:

градиентная линза № 1 обладает наименьшим значением реальной поперечной сферической

Заключение

Исследование "толстых" базовых изопланатических линз с ОЛРПП показало, что они имеют преимущество перед однородными аналогами в отношении сферической aberrации, кривизны изображения и дисторсии.

Также необходимо отметить, что во всех "толстых" изопланатических линзах с ОЛРПП обеспечиваются угловые поля более 60° без виньетирования и относительные отверстия выше, чем 1:3. При этом доля aberrаций высших порядков оказывается сравнительно небольшой. Таким обра-

зом, синтез "толстых" базовых изопланатических линз с применением теории аббераций третьего порядка обеспечивает высокую степень соответствия реальным абберациям.

Описанные выше преимущества "толстых" базовых изопланатических линз с ОЛРПП позволяют рекомендовать их для применения в качестве базовых элементов миниатюрных широкоугольных объективов, в которых вследствие технологи-

ческих ограничений затруднено применение "тонких" компонентов.

Л и т е р а т у р а

1. Алимов А. Е. Синтез и исследование изопланатической базовой градиентной линзы с осевым распределением показателя преломления// Прикладная физика. 2010. № 1. С. 118.

2. Русинов М. М. Техническая оптика: учеб. пособие для вузов. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979.

Investigation of a "thick" isoplanatic axial gradient-index lens

A. E. Alimov

Moscow Research Institute of Television, 7a-1 Golianovskaya str., Moscow, 105094, Russia

E-mail: deminox@yandex.ru

T. S. Rovenskaya

Bauman Moscow State Technical University, 5 Second Bauman str., Moscow, 105005, Russia

This work is dedicated to the design of a "thick" isoplanatic axial gradient-index lens with spherical surfaces. Aberration properties and design data of such lenses were investigated and systematized.

PACS: 42.15.Fr, 42.79.Ry

Keywords: isoplanatic lens, aberration properties, gradient-index optical elements.

Bibliography — 2 references.

Received October 2, 2010

* * *