

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-808-816

УДК 535.317

Анализ аберраций клина как компенсационного и функционального элемента в системах дополненной и виртуальной реальности

Галина Эдуардовна Романова¹, Нгок Шон Нгуен²

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ romanova_g_e@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9348-8540>

² sonitmo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9456-985X>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены оптические системы виртуальной реальности, в которых применяется оптический клин для устранения или уменьшения конфликта конвергенции и аккомодации (vergence-accommodation conflict, VAC). Наклонные поверхности оптического клина вносят в оптическую систему специфические аберрации, которые могут критически сказаться на качестве изображения. **Методы.** Искажения, вносимые клином, проанализированы с использованием соотношений, полученных на основе теории аберраций третьего порядка. В отличие от существующих подходов, соотношения получены без допущений о небольшой величине преломляющего угла или толщины клина. **Основные результаты.** Показано, что в схеме с оптическим клином при типичных для систем виртуальной реальности характеристиках зависимость астигматизма от углового поля имеет линейный характер и значительно превышает остальные аберрации. Для получения изображения высокого качества наиболее успешная компенсация такой аберрации может быть достигнута за счет применения дифракционных оптических элементов (киноформ) или линзы Френеля. Приведены примеры оптических систем с клином, разработанные с учетом требований к габаритным размерам систем виртуальной реальности и качеству изображения. **Практическая значимость.** Полученные соотношения для аберраций оптического клина и наклонной поверхности позволяют оценить коррекционные возможности схем с использованием подобных элементов при произвольных характеристиках. Предложенные решения могут найти применение в системах виртуальной реальности с уменьшенным значением конфликта конвергенции и аккомодации.

Ключевые слова

оптический клин, конфликт аккомодации и конвергенции, анализ аберраций, виртуальная реальность, дополненная реальность

Благодарности

Нгуен Нгок Шон благодарит за поддержку Вьетнамский стипендиальный совет.

Ссылка для цитирования: Романова Г.Э., Нгуен Н.Ш. Анализ аберраций клина как компенсационного и функционального элемента в системах дополненной и виртуальной реальности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 808–816. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-808-816

Aberration analysis of a wedge as a compensator element in augmented and virtual reality systems

Galina E. Romanova¹, Ngoc Son Nguyen²

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ romanova_g_e@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9348-8540>

² sonitmo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9456-985X>

Abstract

The paper considers the optical systems of virtual reality, which use an optical wedge to eliminate or reduce the conflict of convergence and accommodation (vergence-accommodation conflict, VAC). The inclined surfaces of the

optical wedge introduce specific aberrations into the optical system that can critically affect image quality. The authors analyzed wedge aberrations using relationships derived from the third-order aberration theory. In contrast to existing approaches, the relationships were obtained without the assumption of a small refractive angle or wedge thickness. The results demonstrate that in the scheme with an optical wedge, with characteristics typical for virtual reality systems, the dependence of astigmatism on the angular field is linear and significantly exceeds the other types of aberrations. It is shown that to obtain a high-quality image, the most successful compensation for such aberration can be achieved by using diffractive optical elements (kinofoms) or a Fresnel lens. The paper gives examples of optical systems with a wedge, developed taking into account the requirements for the overall dimensions of virtual reality systems and image quality. The obtained ratios for the aberrations of the optical wedge and the inclined surface make it possible to evaluate the correction capabilities of schemes where such elements are used with arbitrary characteristics. The proposed solutions can be used in virtual reality systems with a reduced value of vergence-accommodation conflict.

Keywords

optical wedge, vergence-accommodation conflict, aberration analysis, virtual reality, augmented reality

Acknowledgements

Nguyen Ngoc Son acknowledges support from the Vietnam Scholarship Council.

For citation: Romanova G.E., Nguyen N.S. Aberration analysis of a wedge as a compensator element in augmented and virtual reality systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 808–816 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-808-816

Введение

В последние годы технологии виртуальной и дополненной реальности стали широко известны благодаря использованию в индустрии развлечений, образовании, медицине и других областях. Конфликт аккомодации и конвергенции (vergence-accommodation conflict, VAC) в таких системах является фундаментальной проблемой, которая приводит к тому, что пользователи чувствуют дискомфорт и усталость [1–3]. Чтобы преодолеть это ограничение, было предложено множество решений, к которым можно отнести дисплеи с переменным фокусным расстоянием или переменной плоскостью фокусировки (varifocal displays) [4–6], дисплеи с несколькими плоскостями изображения — мультифокальные (multifocal displays) [7–9], дисплеи светового поля (light field displays) [10–12] и другие. Таким образом, известные решения этой проблемы в основном предполагают использование достаточно громоздких и сложных оптических схем [13, 14] и/или алгоритмов отслеживания взгляда.

Для преодоления конфликта конвергенции и аккомодации предложено использовать клин [15]: оптический клин позволяет обеспечить расхождение конвергенции

и аккомодации в пределах зоны комфорта. Клиновое оптика традиционно применяется для отклонения пучка лучей на небольшой угол и коррекции наклона плоскости изображения [16]. Введение клина в оптическую систему дополненной реальности в качестве элемента, обеспечивающего уменьшение VAC, требует исследования его aberrаций для обеспечения возможности выбора оптимальной схемы, работающей с ним в составе системы виртуальной реальности.

Устранение конфликта конвергенции и аккомодации за счет применения клина

Применение клиновой оптики для устранения VAC основано на идеях Ю.А. Утехина [17]. Клин добавляется перед глазом наблюдателя, и роль клина в этом случае заключается в том, чтобы отклонить зрительную ось на угол, соответствующий расстоянию аккомодации. Действие клина показано на рис. 1, где A — осевая точка дисплея; A' — изображение точки A ; b — межзрачковое расстояние; $l, 2$ — лучи от осевой точки дисплея, проходящие через центр зрачка; φ — угол отклонения первого луча от исходного направления; γ — преломляющий угол клина; n — показатель пре-

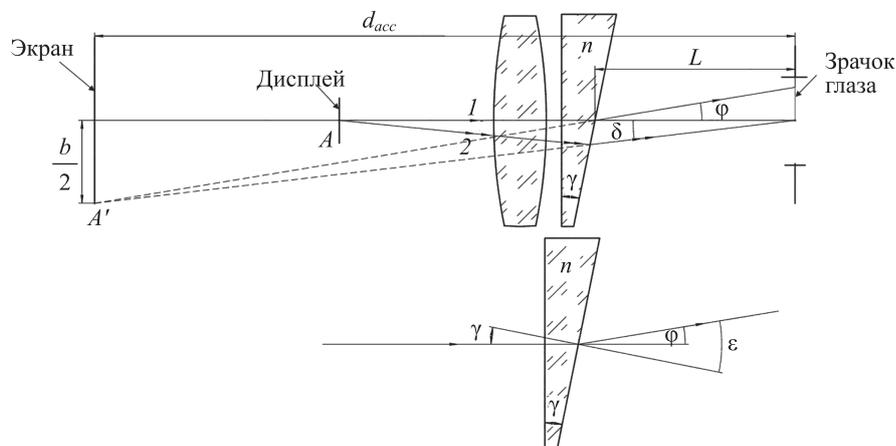


Рис. 1. Принципиальная схема работы клина для одного канала (с одним глазом)

Fig. 1. Principle diagram of the wedge operation for one channel (one eye)

ломления стекла клина; ε — угол преломления первого луча на второй поверхности клина; L — положение зрачка глаза наблюдателя относительно системы.

На рис. 1 угол δ — угол конвергенции, причем $\delta = b/(2d_{acc})$.

В системе отсутствует VAC, при условии [15]:

$$\delta = \arctan \left[\frac{d_{acc} - L}{d_{acc}} \cdot \tan(\arcsin(n \cdot \sin(\gamma)) - \gamma) \right], \quad (1)$$

где d_{acc} — расстояние аккомодации.

Таким образом, формула (1) дает возможность определить значения необходимого угла клина для устранения VAC при известном расстоянии аккомодации и глазной базе. Например, при $d_{acc} = 600$ мм, $L = 20$ мм, $b = 62$ мм и $n = 1,5$, угол отклонения зрительной оси $\delta = 2^\circ 58'$, а угол клина $\gamma = 6^\circ 14'$.

В настоящей работе приведены примеры систем, которые рассчитаны для расстояния аккомодации 600 мм (расстояние, на котором формируется виртуальное изображение). Отметим, что указанные номинальные значения параметров используются при расчете оптической системы и обеспечивают отсутствие конфликта конвергенции и аккомодации для глазной базы 62 мм, но, как было показано в работе [15], позволяют обеспечить величину VAC в зоне комфорта и при вариациях характеристик пользователя.

Анализ aberrации третьего порядка клина

Если угол клина составляет относительно большую величину, необходимо выполнить анализ aberrаций, вносимых им в оптическую схему. Расчет коэффициентов aberrаций третьего порядка для клиновой оптики приведен в работах [18–20]. С целью анализа особенностей работы клиновой оптики в составе системы дополненной реальности необходимо рассмотреть коэффициенты более подробно, так как при выводе формул вводятся упрощения, которые для рассматриваемого случая дают достаточно грубое приближение. Например, в случае рассмотрения бесконечно тонкого клина или клина с малым углом при вершине.

Рассмотрим aberrации, вносимые наклонной плоской поверхностью, расположенной в сходящихся пучках лучей (рис. 2):

— пучок лучей, в котором главный луч идет перпендикулярно к наклонной поверхности (для определения коэффициента сферической aberrации и выделения ее на фоне остальных aberrаций при наклонном положении плоской поверхности);

— произвольный наклонный пучок — в данном случае в качестве наклонного пучка удобно рассматривать пучок, главный луч которого идет в осевую точку предмета.

Суммы Зейделя S_I, S_{II}, S_{III} , определяющие сферическую aberrацию, кому и астигматизм для одиночной поверхности, могут быть описаны выражениями [21]:

$$S_I = y_1 \cdot (n_2 \cdot u_2 \cdot I_1'^2 - n_1 \cdot u_1 \cdot I_1^2), \quad (2)$$

$$S_{II} = S_I \cdot \frac{\beta_1}{I_1}, \quad (3)$$

$$S_{III} = S_I \cdot \left(\frac{\beta_1}{I_1} \right)^2, \quad (4)$$

где n_1, n_2 — показатели преломления до и после наклонной поверхности; I_1, I_1' — углы падения и преломления апертурного луча для первого пучка; β_1, β_1' — углы падения и преломления главного луча для второго пучка; y_1 — высота апертурного луча на первой поверхности, u_1, u_2 — апертурные углы луча до и после преломления (рис. 2).

С учетом закона преломления из выражений (2)–(4) получим:

$$S_I = y_1 \cdot (n_2 \cdot u_2 \cdot I_1'^2 - n_1 \cdot u_1 \cdot I_1^2) = (n_1 \cdot u_1)^3 \cdot y_1 \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right),$$

$$S_{II} = S_I \cdot \frac{\beta_1}{I_1} = n_1^3 \cdot u_1^2 \cdot y_1 \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \cdot \beta_1,$$

$$S_{III} = S_I \cdot \frac{\beta_1^2}{I_1^2} = n_1^3 \cdot u_1 \cdot y_1 \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \cdot \beta_1^2.$$

Примем, что: $d_{acc} = 600$ мм, угол наклона поверхности $\gamma = 6^\circ$, диаметр зрачка $D = 10$ мм, длина волны $\lambda_e = 0,54607$ мкм, положение зрачка относительно

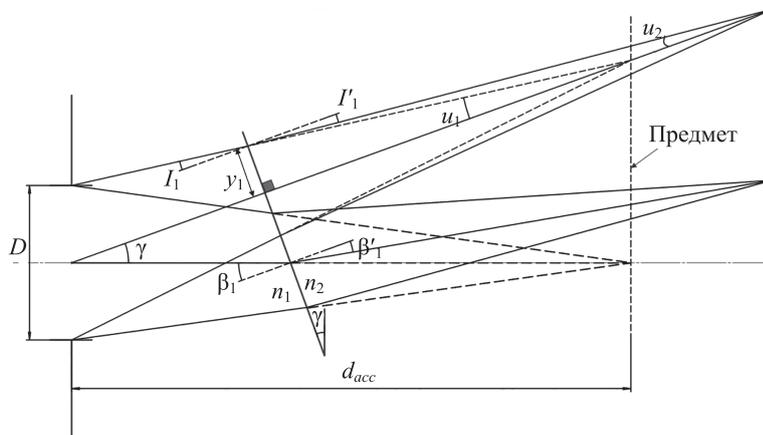


Рис. 2. К расчету aberrаций третьего порядка наклонной поверхности
Fig. 2. The calculation of the third-order aberration formulas for an inclined surface

поверхности $L = 20$ мм и $n_1 = 1, n_2 = 1,5$. Определим апертурный угол из геометрических соотношений $u_1 = 28'23''$ и величину $y_1 = 4,813$ мм.

Оценку наиболее критичной aberrации и характера ее зависимости удобно выполнять с помощью коэффициентов волнового фронта [22]:

$$W_{040} = \frac{S_I}{8}, \quad (5)$$

$$W_{131} = \frac{S_{II}}{2}, \quad (6)$$

$$W_{222} = \frac{S_{III}}{2}. \quad (7)$$

Характер зависимости коэффициентов показан на рис. 3.

В результате aberrаций для наклонной поверхности можно сделать следующий вывод: для рассмотренных параметров, т. е. при работе наклонной поверхности в составе систем виртуальной и дополненной реальности, наибольшее влияние на качество изображения оказывает астигматизм, причем он имеет квадратичную зависимость от поля. Влияние сферической aberrации невелико, большее влияние оказывает остаточная кома.

Полученные результаты можно использовать для оценки aberrаций, вносимых клином в систему. На рис. 4 представлена работа клина с наклонной первой поверхностью, и обозначения, используемые в формулах расчета aberrаций.

Коэффициенты Зейделя для клина найдем с помощью выражений (2)–(4), при $n_1 = n_3 = 1$:

$$S_I = S_{I1} + S_{I2} = \left(1 - \frac{1}{n_2^2}\right)(y_2 \cdot \alpha_1^3 - y_1 \cdot u_1^3),$$

$$S_{II} = S_{II1} + S_{II2} = \left(1 - \frac{1}{n_2^2}\right)(y_2 \cdot \alpha_1^2 \cdot \beta'_2 - y_1 \cdot u_1^2 \cdot \beta_1),$$

$$S_{III} = S_{III1} + S_{III2} = \left(1 - \frac{1}{n_2^2}\right)(y_2 \cdot \alpha_1 \cdot \beta_2^2 - y_1 \cdot u_1 \cdot \beta_1^2).$$

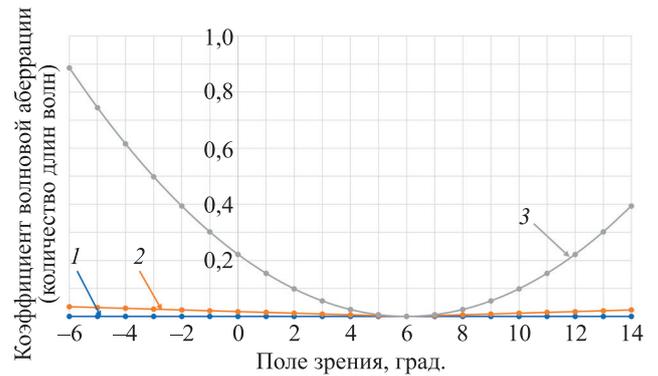


Рис. 3. Графики зависимости коэффициентов aberrаций третьего порядка для наклонной поверхности:

1 — сферическая aberrация; 2 — кома; 3 — астигматизм
 Fig. 3. Graphs of the dependence of the third-order aberration coefficients for an inclined surface. 1 — Spherical aberration; 2 — Coma; 3 — Astigmatism

Если клин можно считать тонким ($y_1 = y_2 = y$), тогда:

$$S_I = \left(1 - \frac{1}{n_2^2}\right) \cdot y \cdot (\alpha_1^3 - u_1^3),$$

$$S_{II} = \left(1 - \frac{1}{n_2^2}\right) \cdot y \cdot (\alpha_1^2 \cdot \beta'_2 - u_1^2 \cdot \beta_1),$$

$$S_{III} = \left(1 - \frac{1}{n_2^2}\right) \cdot y \cdot (\alpha_1 \cdot \beta_2^2 - u_1 \cdot \beta_1^2).$$

Полученные выражения дают возможность оценить наиболее критичные aberrации для разрабатываемой системы, с учетом рабочей апертуры, а также выбрать материал клина с точки зрения оптимального баланса aberrаций.

Зададим следующие параметры системы для расчета: $d_{acc} = 600$ мм, $\gamma = 6^\circ$, $\lambda_e = 0,54607$ мкм, $D = 10$ мм, $L = 20$ мм, показатель преломления материала клина

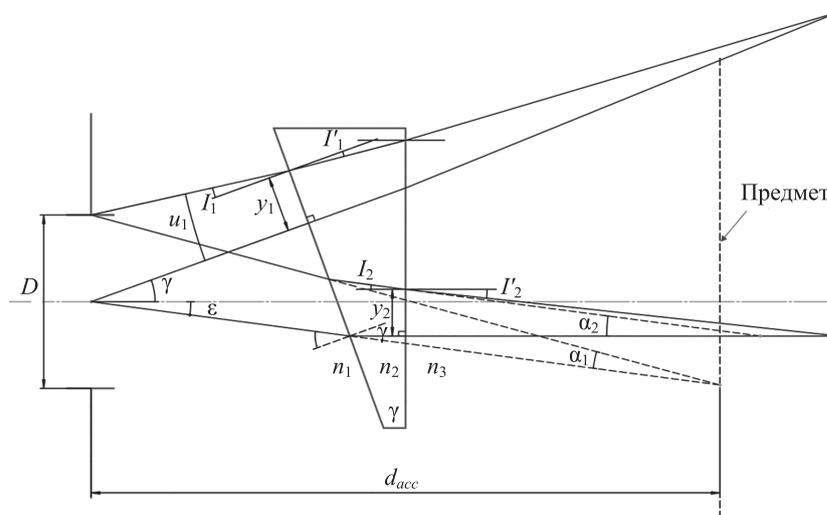


Рис. 4. К расчету aberrаций третьего порядка простого клина

Fig. 4. The derivation of the third-order aberration formulas for a simple wedge

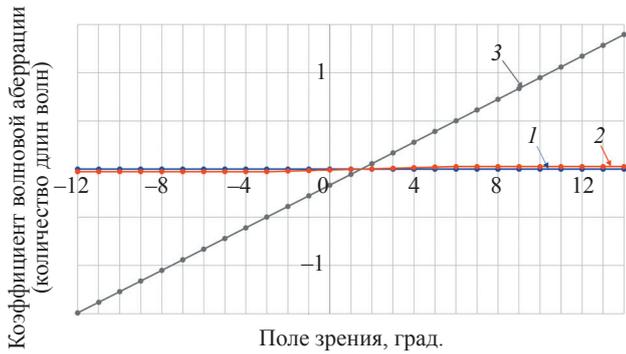


Рис. 5. Графики зависимости коэффициентов aberrаций третьего порядка для простого клина: 1 — сферическая aberrация; 2 — кома; 3 — астигматизм

Fig. 5. Graphs of the dependence of the third-order aberration coefficients for a simple wedge. 1 — Spherical aberration, 2 — Coma, 3 — Astigmatism

$n_2 = 1,5$, толщина клина $d = 2$ мм, тогда угол $u_1 = 28'23''$. Значение α_1 определим с помощью геометрических соотношений: $\alpha_1 = 28'34''$, а величина $y = y_1 = 4,813$ мм.

Оценку наиболее критичной aberrации и характера ее зависимости выполним с помощью коэффициентов волнового фронта (5)–(7).

Характер зависимости коэффициентов показан на рис. 5.

Как и для случая отдельной наклонной поверхности, наибольшее влияние на качество изображения оказывает астигматизм, причем он имеет линейную зависимость от поля.

Таким образом, для эффективного расчета систем дополненной и виртуальной реальности с уменьшен-

ным конфликтом конвергенции и аккомодации за счет применения клиновой оптики для обеспечения высокого качества изображения необходимо применять элементы, обеспечивающие компенсацию линейного астигматизма, вносимого клином.

Примеры оптической системы для монохроматического излучения

В табл. 1 приведены технические характеристики системы дополненной реальности, работающей с монохроматическим излучением.

Отметим, что в системе полный диаметр входного зрачка (в обратном ходе лучей) — размер зрачковой зоны составил 10 мм, но для оценки качества изображения диаметр зрачка равен 4 мм. Для оценки влияния смещения зрачка наблюдателя внутри зрачковой зоны рассмотрены конфигурации систем:

- со зрачком, расположенным по центру;
- со зрачком, смещенном на $\Delta x = \pm 3$ мм в сагиттальном направлении;
- со зрачком, смещенном на $\Delta y = \pm 3$ мм в меридиальном направлении.

При разработке систем виртуальной и дополненной реальности важным ограничением является минимизация количества элементов.

Теоретическое исследование показало, что клиновая оптика вносит специфический линейный астигматизм, который невозможно скорректировать классическими линзами (даже используя асферические поверхности) при сохранении простой конструкции.

Рассмотрение простых конструкций (1–2 линзы) таких систем показало, что для получения высокого качества изображения необходимо использовать линзы Френеля или киноформные поверхности. При использовании таких нестандартных элементов зависимости

Таблица 1. Технические характеристики системы (для монохроматического излучения)

Table 1. Main technical characteristics of the system (monochromatic radiation)

Характеристика	Значение
Фокусное расстояние, мм	30
Поле зрения 2ω	34°
Микродисплей	0,71" OLED BO071FHDMI2 ¹ 1920 × 1080, шаг пиксела 8 мкм
Длина волны, мкм	0,5607
Полный диаметр зрачка, мм	10
Оценка качества изображения при смещенном зрачке диаметром, мм	4
Значение функции передачи модуляции на 60 лин/мм, не менее	0,4
Вынос зрачка, не менее, мм	20
Расстояние аккомодации, мм	600
Угол клина	6°7'
Материал клина	PMMA (полиметилметакрилат)

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.panoxdisplay.com/micro-display/0-71-inch-1920x1080-micro-oled-mipi.html> (дата обращения: 26.10.2021).

полевых аберраций имеют иной характер по сравнению с классическими сферическими и асферическими линзами [23, 24], что позволяет использовать их для оптимального баланса аберраций в рассматриваемом случае.

Зададим следующие общие параметры для рассматриваемых примеров: $f' = 30$ мм, $2\omega = 34^\circ$, $D = 10$ мм. Точечные диаграммы и функция передачи модуляции на рис. 6 и 7 приводятся для конфигурации $D = 4$ мм со смещением зрачка по $\Delta x = 0$ мм, $\Delta y = 0$ мм.

Пример 1. На рис. 6 показан пример системы, где для получения высокого качества изображения с учетом аберраций клина использована одна киноформная поверхность. Максимальный среднеквадратический диаметр пятна рассеяния составляет около 7 мкм, что в угловой мере с учетом переноса в пространство глаза

пользователя составляет не более $1'$. Коэффициент передачи контраста по всему полю на частоте 60 лин/мм — 0,4 и выше (рис. 6, с).

Конструктивные параметры системы представлены в табл. 2.

Пример 2. На рис. 7 представлен пример системы с применением линзы Френеля. Максимальный угловой размер пятна рассеяния в пространстве глаза не превышает $1'12''$. На рис. 7, b показана схема системы с обоими каналами, видно, что при применении клина проблема конфликта аккомодации и конвергенции была решена, и система дает хорошее качество изображения. Функция передачи модуляции показана на рис. 7, d.

Конструктивные параметры системы с линзой Френеля и одной асферической поверхностью представлены в табл. 3.

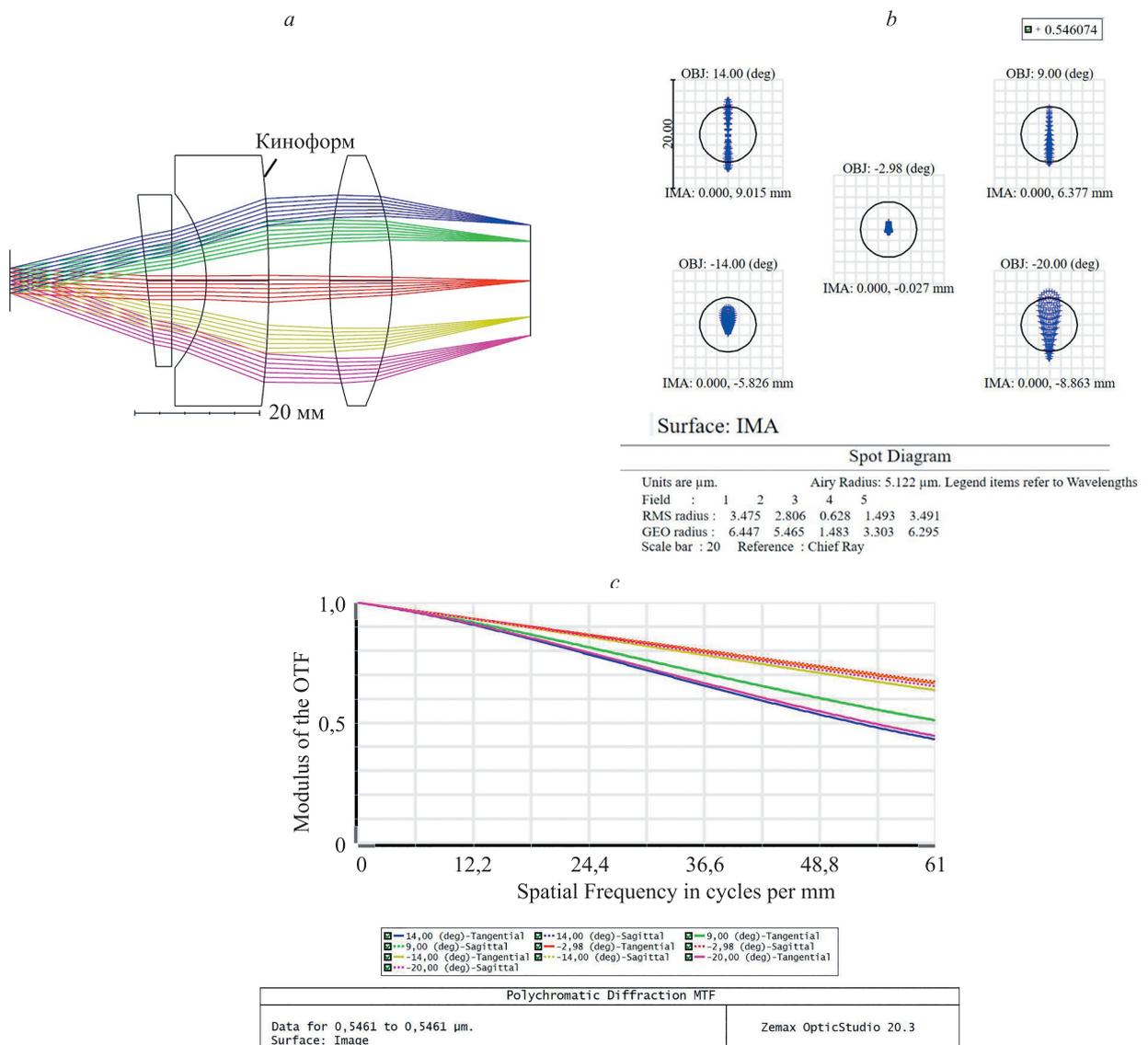


Рис. 6. Система для монохроматического излучения для одного канала: оптическая схема (a); точечная диаграмма (b); функция передачи модуляции (c)

Fig. 6. System for one channel: system layout (a), spot diagram (b), MTF (c)

Таблица 2. Конструктивные параметры системы с киноформным элементом (в обратном ходе лучей)
 Table 2. Construction parameters of the system with a kinoform element (in reversed ray path)

Тип поверхности	Радиусы, мм	Осевые расстояния, мм	Материал
Предмет	∞	-600	—
Диафрагма	∞	21,9	—
Наклонная ¹	—	4	PMMA
Стандарт	∞	5,5	—
Стандарт	-22,213	10	PMMA
Киноформ ²	-178,936	9,8	—
Стандарт	73,714	10	PMMA
Стандарт	-50,262	22,17	—

¹ Наклонная поверхность, угол наклона $6^{\circ}7'$.

² Поверхность Binary 2 [25], порядок дифракции $M = 1$, нормировочный радиус $N_R = 21$ мм, коэффициенты уравнения: $A_1 = -8,4 \cdot 10^4$, $A_2 = 5038$, $A_3 = 814$, $A_4 = 353$.

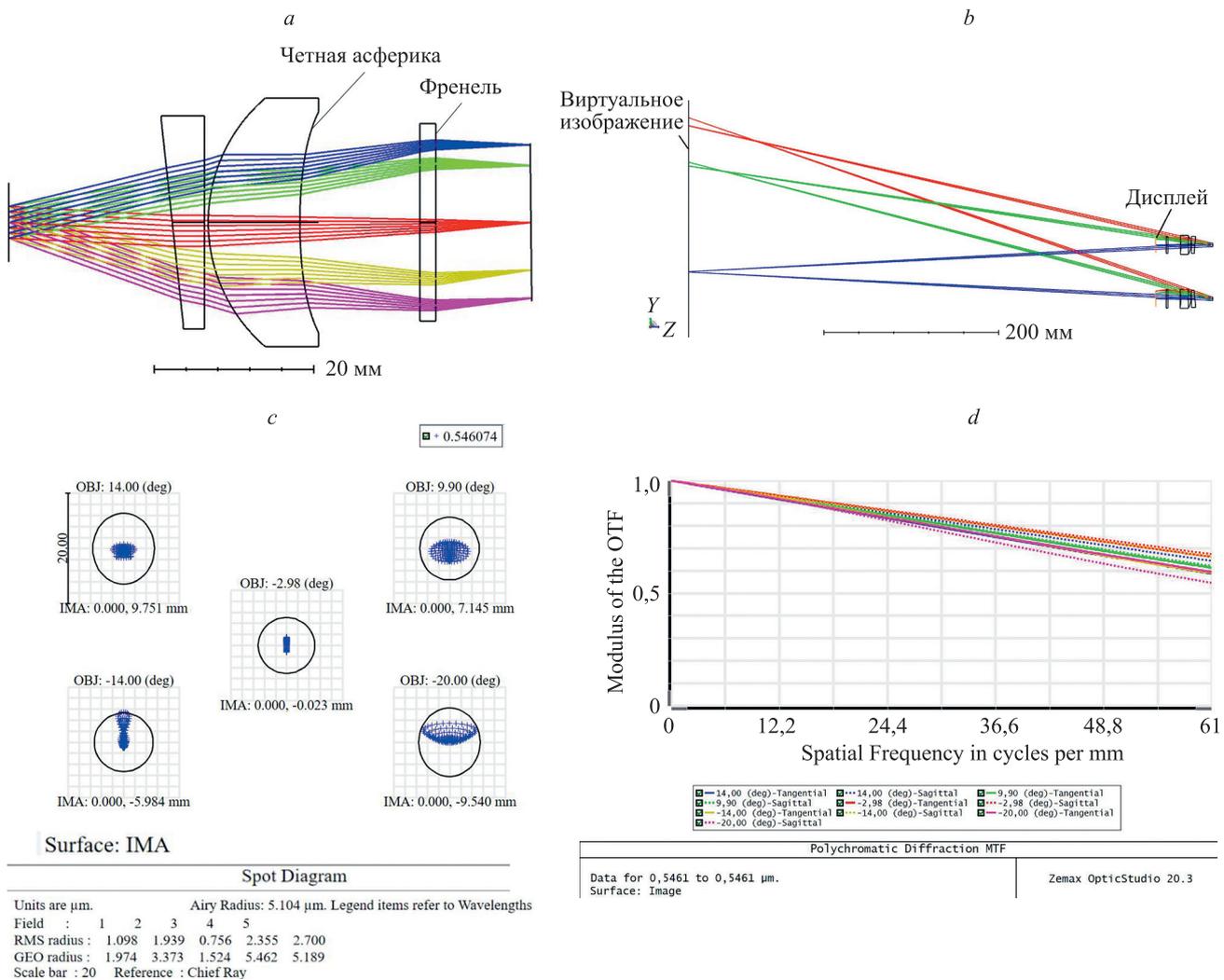


Рис. 7. Система с линзой Френеля: оптическая схема (один канал — на один глаз) (а); схема системы с обоими каналами (б); точная диаграмма (с), функция передачи модуляции (д)

Fig. 7. System with a Fresnel lens and one aspherical surface: system layout (one channel per one eye) (a), scheme of a system with both channels (b), spot diagram (c), MTF (d)

Таблица 3. Конструктивные параметры системы с линзой Френеля и одной асферической поверхностью (в обратном ходе лучей)

Table 3. Construction parameters of the system with a Fresnel lens and one aspherical surface (in reversed ray path)

Тип поверхности	Радиусы, мм	Осевые расстояния, мм	Материал
Предмет	∞	-600	—
Диафрагма	∞	20,5	—
Наклонная ¹	—	4	PMMA
Стандарт	∞	0,5	—
Стандарт	20,681	11,5	PMMA
Even asphere ²	64,685	15	—
Стандарт	∞	2	PMMA
Поверхность Френеля ³	-21,959	11,92	—

¹ Наклонная поверхность, угол наклона $6^\circ 7'$.

² Поверхность Even asphere [25], коэффициенты уравнения: $\alpha_1 = 2,05 \cdot 10^{-5}$; $\alpha_2 = -9,85 \cdot 10^{-9}$; $\alpha_3 = 9,56 \cdot 10^{-11}$.

³ Поверхность Френеля [25], коэффициенты уравнения: $\alpha_1 = 4,22 \cdot 10^{-5}$; $\alpha_2 = 8,02 \cdot 10^{-8}$; $\alpha_3 = -4,52 \cdot 10^{-10}$; $\alpha_4 = 3,722 \cdot 10^{-12}$.

Заключение

В работе выполнен анализ особенностей характера aberrаций системы виртуальной реальности, где используется оптический клин для устранения конфликта конвергенции и аккомодации. Проведенный анализ показал, что наиболее критичной aberrацией является астигматизм, линейно зависящий от величины поля. Показано и подтверждено расчетными примерами, что для коррекции aberrаций в таких системах наиболее

эффективно использовать специальные оптические элементы — киноформы и линзы Френеля. Представленные примеры расчета обеспечивают высокое качество изображения и могут найти применение в системах виртуальной реальности с уменьшенным значением конфликта конвергенции и аккомодации. Полученные формулы для aberrаций оптического клина, благодаря отсутствию упрощений и допущений при их выводе, могут применяться для анализа aberrаций в разнообразных схемах, использующих клиновую оптику.

Литература

- Hoffman D.M., Girshick A.R., Akeley K., Banks M.S. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue // *Journal of Vision*. 2008. V. 8. N 3. P. 33. <https://doi.org/10.1167/8.3.33>
- Shibata T., Kim J., Hoffman D.M., Banks M.S. The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays // *Journal of Vision*. 2011. V. 11. N 8. P. 11. <https://doi.org/10.1167/11.8.11>
- Bankset M.S., Kim J., Shibata T. Insight into vergence-accommodation mismatch // *Proceedings of SPIE*. 2013. V. 8735. P. 873509. <https://doi.org/10.1117/12.2019866>
- Aksit K., Lopes W., Kim J., Shirley P., Luebke D. Near-eye varifocal augmented reality display using see-through screens // *ACM Transactions on Graphics*. 2017. V. 36. N 6. P. 1. <https://doi.org/10.1145/3130800.3130892>
- Hasnain A., Laffont P.-Y., Jalil S.B.A., Buyukburc K., Guillemet P.-Y., Wirajaya S., Khoo L., Teng D., Bazin J.C. Piezo-actuated varifocal head-mounted displays for virtual and augmented reality // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 10942. P. 1094207. <https://doi.org/10.1117/12.2509143>
- Liu S., Cheng D., Hua H. An optical see-through head mounted display with addressable focal planes // *Proc. of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. 2008. P. 33–42. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637321>
- Akeley K., Watt S.J., Girshick A.R., Banks M.S. A stereo display prototype with multiple focal distances // *ACM Transactions on Graphics*. 2004. V. 23. N 3. P. 804. <https://doi.org/10.1145/1015706.1015804>
- Rolland J.P., Krueger M.W., Goon A. Multifocal planes head-mounted displays // *Applied Optics*. 2000. V. 39. N 19. P. 3209–3215. <https://doi.org/10.1364/AO.39.003209>
- Cheng D., Wang Q., Wang Y., Jin G. Lightweight spatial-multiplexed dual focal-plane head-mounted display using two freeform prisms // *Chinese Optics Letters*. 2013. V. 11. N 3. P. 031201 <https://doi.org/10.3788/COL201311.031201>

References

- Hoffman D.M., Girshick A.R., Akeley K., Banks M.S. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 33. <https://doi.org/10.1167/8.3.33>
- Shibata T., Kim J., Hoffman D.M., Banks M.S. The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of Vision*, 2011, vol. 11, no. 8, pp. 11. <https://doi.org/10.1167/11.8.11>
- Bankset M.S., Kim J., Shibata T. Insight into vergence-accommodation mismatch. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8735, pp. 873509. <https://doi.org/10.1117/12.2019866>
- Aksit K., Lopes W., Kim J., Shirley P., Luebke D. Near-eye varifocal augmented reality display using see-through screens. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, vol. 36, no. 6, pp. 1. <https://doi.org/10.1145/3130800.3130892>
- Hasnain A., Laffont P.-Y., Jalil S.B.A., Buyukburc K., Guillemet P.-Y., Wirajaya S., Khoo L., Teng D., Bazin J.C. Piezo-actuated varifocal head-mounted displays for virtual and augmented reality. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 10942, pp. 1094207. <https://doi.org/10.1117/12.2509143>
- Liu S., Cheng D., Hua H. An optical see-through head mounted display with addressable focal planes. *Proc. of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2008, pp. 33–42. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637321>
- Akeley K., Watt S.J., Girshick A.R., Banks M.S. A stereo display prototype with multiple focal distances. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, vol. 23, no. 3, pp. 804. <https://doi.org/10.1145/1015706.1015804>
- Rolland J.P., Krueger M.W., Goon A. Multifocal planes head-mounted displays. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 19, pp. 3209–3215. <https://doi.org/10.1364/AO.39.003209>
- Cheng D., Wang Q., Wang Y., Jin G. Lightweight spatial-multiplexed dual focal-plane head-mounted display using two freeform prisms. *Chinese Optics Letters*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 031201 <https://doi.org/10.3788/COL201311.031201>

10. Song W., Wang Y., Cheng D., Liu Y. Light field head-mounted display with correct focus cue using microstructure array // *Chinese Optics Letters*. 2014. V. 12. N 6. P. 060010. <https://doi.org/10.3788/COL201412.060010>
11. Song W., Wang Y., Cheng D., Liu Y. Design of light field head-mounted display // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9293. P. 92930J. <https://doi.org/10.1117/12.2075183>
12. Sluka T. Near-eye sequential light-field projector with correct monocular depth cues. Patent WO2018091984A1. 2017.
13. Wilson A., Hua H. High-resolution optical see-through vari-focal-plane head-mounted display using freeform Alvarez lenses // *Proceedings of SPIE*. 2018. V. 10676. P. 106761J. <https://doi.org/10.1117/12.2315771>
14. Cui W., Gao L. Optical mapping near-eye three-dimensional display with correct focus cues // *Optics Letters*. 2017. V. 42. N 13. P. 2475–2478. <https://doi.org/10.1364/OL.42.002475>
15. Нгуен Н., Романова Г.Э. Преодоление конфликта конвергенции и аккомодации в системах виртуальной и дополненной реальности // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2021. Т. 64. № 2. С. 143–152. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-2-143-152>
16. Riedl M.J. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems*. SPIE Press, 2001. P. 90.
17. Утехин Ю.А. Оптические методы и средства восстановления бинокулярного зрения: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Институт точной механики и оптики. СПб., 1993. 49 с.
18. Sasián J.M. Aberrations from a prism and a grating // *Applied Optics*. 2000. V. 39. N 1. P. 34–39. <https://doi.org/10.1364/AO.39.000034>
19. Howard J.W. Formulas for the coma and astigmatism of wedge prisms used in converging light // *Applied Optics*. 1985. V. 24. N 23. P. 4265–4268. <https://doi.org/10.1364/AO.24.004265>
20. Barth C.J., Oepts D. Stigmatic and coma-free imaging with a thick prism: a comparison of third-order theory and ray-tracing results // *Applied Optics*. 1988. V. 27. N 18. P. 3838–3844. <https://doi.org/10.1364/AO.27.003838>
21. Kidger M. *Fundamental Optical Design*. SPIE Press, 2002. P. 107.
22. Geary J.M. *Introduction to Lens Design: With Practical ZEMAX Examples*. Willmann-Bell, 2002. P. 110.
23. Delano E. Primary aberrations of Fresnel lenses // *Journal of the Optical Society of America*. 1974. V. 64. N 4. P. 459–468. <https://doi.org/10.1364/JOSA.64.000459>
24. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. 223 с.
25. Zemax *Optic Studio 19.8: User manual*. October 2019.
10. Song W., Wang Y., Cheng D., Liu Y. Light field head-mounted display with correct focus cue using microstructure array. *Chinese Optics Letters*, 2014, vol. 12, no. 6, pp. 060010. <https://doi.org/10.3788/COL201412.060010>
11. Song W., Wang Y., Cheng D., Liu Y. Design of light field head-mounted display. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9293, pp. 92930J. <https://doi.org/10.1117/12.2075183>
12. Sluka T. Near-eye sequential light-field projector with correct monocular depth cues. *Patent WO2018091984A1*, 2017.
13. Wilson A., Hua H. High-resolution optical see-through vari-focal-plane head-mounted display using freeform Alvarez lenses. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10676, pp. 106761J. <https://doi.org/10.1117/12.2315771>
14. Cui W., Gao L. Optical mapping near-eye three-dimensional display with correct focus cues. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 13, pp. 2475–2478. <https://doi.org/10.1364/OL.42.002475>
15. Ngoc Son Nguyen, Romanova G.E. Overcoming the conflict of convergence and accommodation in virtual and augmented reality systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, vol. 64, no. 2, pp. 143–152. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-2-143-152>
16. Riedl M.J. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems*. SPIE Press, 2001, pp. 90.
17. Utekhin Yu.A. *Optical methods and tools for restoring binocular vision*. Dissertation abstract for the degree of doctor of technical sciences. St. Petersburg, Saint Petersburg Institute of Fine Mechanics and Optics, 1993, 49 p. (in Russian)
18. Sasián J.M. Aberrations from a prism and a grating. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 1, pp. 34–39. <https://doi.org/10.1364/AO.39.000034>
19. Howard J.W. Formulas for the coma and astigmatism of wedge prisms used in converging light. *Applied Optics*, 1985, vol. 24, no. 23, pp. 4265–4268. <https://doi.org/10.1364/AO.24.004265>
20. Barth C.J., Oepts D. Stigmatic and coma-free imaging with a thick prism: a comparison of third-order theory and ray-tracing results. *Applied Optics*, 1988, vol. 27, no. 18, pp. 3838–3844. <https://doi.org/10.1364/AO.27.003838>
21. Kidger M. *Fundamental Optical Design*. SPIE Press, 2002, pp. 107.
22. Geary J.M. *Introduction to Lens Design: With Practical ZEMAX Examples*. Willmann-Bell, 2002, pp. 110.
23. Delano E. Primary aberrations of Fresnel lenses. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, vol. 64, no. 4, pp. 459–468. <https://doi.org/10.1364/JOSA.64.000459>
24. Bobrov S.T., Greisukh G.I., Turkevich Yu.G. *Optics of diffractive elements and systems*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986, 23 p. (in Russian)
25. Zemax *Optic Studio 19.8 User manual*. October 2019.

Авторы

Романова Галина Эдуардовна кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 8215289000](https://orcid.org/0000-0001-9348-8540), <https://orcid.org/0000-0001-9348-8540>, romanova_g_e@mail.ru

Нгуен Нгок Шон — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9456-985X>, sonitmo@gmail.com

Authors

Galina E. Romanova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 8215289000](https://orcid.org/0000-0001-9348-8540), <https://orcid.org/0000-0001-9348-8540>, romanova_g_e@mail.ru

Ngoc Son Nguyen — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9456-985X>, sonitmo@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.09.2021

Одобрена после рецензирования 12.10.2021

Принята к печати 29.11.2021

Received 08.09.2021

Approved after reviewing 12.10.2021

Accepted 29.11.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»