

Метод компенсации искажений виртуального изображения, формируемого дисплеем дополненной реальности на базе цилиндрического дифракционного волновода

А. Е. Ангервакс¹, Г. Н. Востриков¹, Н. В. Муравьев¹, Р. А. Окунь¹, А. С. Перевозникова¹,
А. Н. Путилин²

¹ ООО «Исследовательский Центр Самсунг», Москва, Россия

² Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Разработан метод, позволяющий в параксиальном приближении компенсировать искажения, вносимые в виртуальное изображение цилиндрическим волноводом при вводе, распространении и выводе излучения в волноводном режиме. Метод основан на предсказании, вносимом в виртуальное изображение при вводе излучения в волновод, за счет вводного дифракционного оптического элемента и компенсации кривизны волновода на выводе за счет дифракционного оптического элемента с переменным периодом. Выведены аналитические законы изменения периода выводного дифракционного элемента для произвольной кривизны цилиндрического волновода и предсказания плоского волнового фронта на вводе излучения в изогнутый волновод.

Ключевые слова: Очки дополненной реальности, Изогнутый волновод, Дифракционные оптические элементы, Голографические оптические элементы

Цитирование: Ангервакс, А. Е. Метод компенсации искажений виртуального изображения, формируемого дисплеем дополненной реальности на базе цилиндрического дифракционного волновода / А. Н. Путилин, А. В. Морозов, В. В. Дружин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 190–193.

Дисплеи дополненной реальности (как правило, для изготовления на их основе персональных очков дополненной реальности) разрабатываются в настоящее время как рядом известных компаний (Google, Apple, Microsoft, Meta, Zeiss), так и многочисленными стартапами (Waveoptics, Dispelix, Lumus, LetinAR, TruLife и т.д.). К настоящему моменту предложено достаточно большое количество концепций таких дисплеев с использованием разных физических принципов и технологий изготовления оптических комбайнеров (элементов совмещения реального и виртуального изображений). Это и оптика сложной формы, и микрзеркала, и дифракционная оптика, и голографические решетки [1–3].

Несмотря на обилие разработок, ни один из прототипов до настоящего времени не запущен в серийное производство; отдельные модели доступны узкому кругу инженеров по тестированию или изготавливаются по заказу военных ведомств. В то же время, продолжается дискуссия о задачах, решаемых подобными устройствами, о технических характеристиках и эстетических критериях, которым они должны удовлетворять, чтобы быть привлекательными для широкого круга потребителей [3, 4]. В частности, предлагается создавать очки дополненной реальности с криволинейными (изогнутыми) волноводами вместо традиционно используемых плоских. Предполагается, что данный подход, во-первых, позволит придать очкам более привычный форм-фактор с изогнутыми стеклами и оправой,

а во-вторых, в перспективе, реализовать функцию коррекции зрения для пользователей с неидеальным зрением (за счет интегрирования линзы в комбайнер) [5–8].

Однако на пути его реализации возникает ряд проблем, в частности, связанных с искажениями, вносимыми в виртуальное изображение при его вводе и выводе из изогнутой волноводной системы (волновода). Данная ситуация проиллюстрирована на рисунке 1, где показана модель волноводной системы с цилиндрическим волноводом без компенсации искажений. Параллельный пучок излучения из проектора попадает на вводную голограмму, распространяется по волноводу за счет эффекта полного внутреннего отражения и выводится выводной голограммой в сторону глаза пользователя. Как видно из рисунка, если не принять специальных мер и использовать голографические решетки с постоянным периодом, то, в отличие от случая плоского волновода, исходно параллельные лучи фокусируются в волноводе. Соответственно, на выходе системы пучок не будет параллельным, и пользователь увидит искаженное изображение.

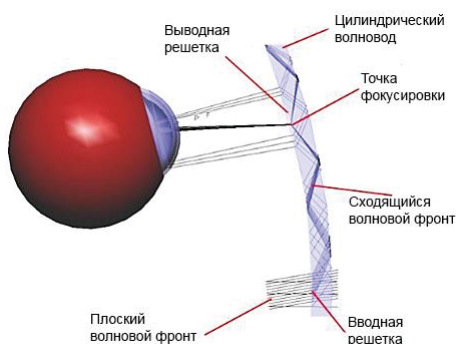


Рис. 1. Волноводная система передачи виртуального изображения от проектора в глаз пользователя, выполненная на основе цилиндрического волновода, в отсутствие компенсации

Для устранения данной проблемы в настоящей работе предлагается вносить предыскажение в виртуальное изображение при его вводе в волновод. В простейшем случае это можно выполнить с помощью цилиндрической линзы с фокусным расстоянием $f = -R$, где R – радиус кривизны волновода (рисунок 2). Линза устанавливается после проектора перед вводной голограммой, расположенной на поверхности волновода. В этом случае лучи, падающие на изогнутый волновод, после преломления и дифракции входят в него под одним и тем же углом независимо от точки входа. Это обеспечивает параллельность пучка, распространяющегося по волноводу за счет эффекта полного внутреннего отражения. Соответственно, будут параллельны лучи, идущие из каждого выходного зрачка в области расположения выводной голограммы. Таким образом, в пределах одного зрачка пользователь будет наблюдать виртуальное изображение, расположенное на бесконечности.

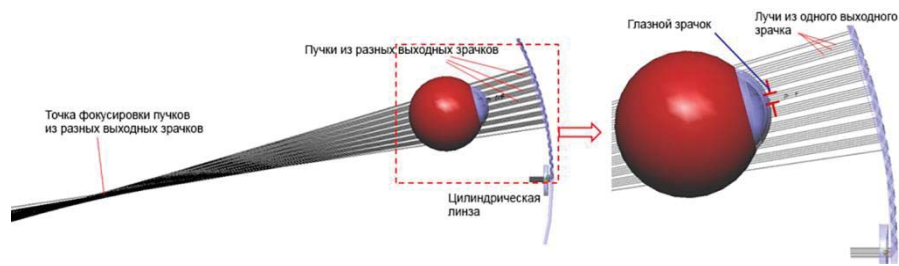


Рис. 2. Волноводная система с компенсацией искажений на вводе цилиндрической линзой

Однако при компенсации кривизны волновода только на вводе, пучки, вышедшие из разных зрачков в разных точках изогнутого волновода, будут сходиться в центре его кривизны (рисунок 2), что приведет к двоению (и даже большей повторяемости) виртуального изображения, наблюдаемого пользователем.

Для решения данной проблемы предлагается ввести компенсацию кривизны волновода на выводе за счет использования выводной голографической решетки с переменным периодом в направлении распространения излучения, что обеспечит параллельность всех вышедших из волновода лучей (рисунок 3). При этом пользователь будет наблюдать неискаженное виртуальное изображение, расположенное на бесконечности.

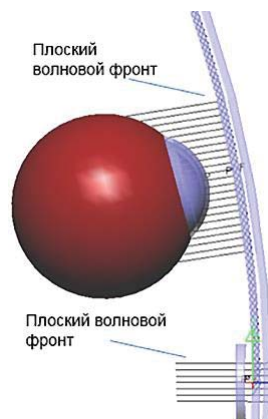


Рис. 3. Волноводная система с компенсацией искажений на вводе цилиндрической линзой и на выводе голографической решеткой с переменным периодом

В настоящей работе выведены аналитические законы изменения периода выводной решетки для произвольной кривизны цилиндрического волновода. Продемонстрирована запись таких решеток и их работа совместно с вводным линзовым компенсатором для передачи виртуального изображения из красной области спектра по цилиндрическому волноводу с радиусом кривизны 150 мм.

Следует отметить, что моделирование компенсации искажений выполнено для параксиального случая, то есть для случая нормального падения узкого пучка излучения от проектора на вводную решетку цилиндрического волновода. Соответствующим образом рассчитаны и работают записанные вводные и выводные голографические решетки. Таким образом, наилучшее качество виртуального изображения достигается лишь для центральных

(ненаклоненных или слабонаклоненных) лучей, идущих от проектора в волноводную систему. Для лучей, имеющих большой угол наклона, компенсация будет существенно слабее.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhang, Y.** Development of planar diffractive waveguides in optical see-through head-mounted displays / Y. Zhang, F. Fang // Precision Engineering. — 2019. — Vol. 60. — P. 482–496. — DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.09.009.
- [2] **Zhan, T.** Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges / T. Zhan, K. Yin, J. Xiong, Z. He, S.-T. Wu // iScience. — 2020. — Vol. 23. — 101397. — 13 p. — DOI: 10.1016/j.isci.2020.101397.
- [3] **Kress, B.C.** Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective / B.C. Kress, I. Chatterjee // Nanophotonics. — 2021. — Vol. 10. — № 1. — P. 41–74. — DOI: 10.1515/nanoph-2020-0410.
- [4] **Chang, Ch.** Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective / Ch. Chang, K. Bang, G. Wetzstein, B. Lee, L. Gao // Optica. — 2020. — Vol. 7. — № 11. — P. 1563–1578. — DOI: 10.1364/OPTICA.406004.
- [5] **Groet, G.** Luxexcel: 3D Printing: combining prescription power and a waveguide into a lightweight lens // Proc. SPIE. — 2021. — Vol. 11764. — 117640F. — DOI: 10.1117/12.2597460.
- [6] **Draper, C.T.** Holographic curved waveguide combiner for HUD/AR with 1-D pupil expansion / C.T. Draper, P.-A. Blanche // Optics Express. — 2022. — Vol. 30. — № 2. — P. 2503–2516. — DOI: 10.1364/OE.445091.
- [7] **Volkov, A.** The first high-resolution curved waveguide with replicated eye-boxes, encapsulated in spectacle lenses / A. Volkov, J. Lewis // Proc. SPIE. — 2022. — Vol. 11932. — 119321G. — DOI: 10.1117/12.2632523.
- [8] Tooz essnz Berlin / URL: <https://tooz.com/essnz-berlin>

Method for compensating distortions of a virtual image formed by an augmented reality display based on a cylindrical diffractive waveguide

A. E. Angervaks¹, G. N. Vostrikov¹, N. V. Muravyev¹, R. A. Okun¹, A. S. Perevoznikova¹, A. N. Putilin²

¹ Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

² Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

A method has been developed that compensates, in the paraxial approximation, for distortions introduced into a virtual image by a cylindrical waveguide during input, propagation, and output of radiation in the waveguide mode. The method is based on pre-distortion introduced into the virtual image when radiation is input into the waveguide due to the input diffractive optical element and compensation of the waveguide curvature at the output due to the diffractive optical element with a variable period. Analytical laws are derived for the period variation of the output diffractive element for an arbitrary curvature of a cylindrical waveguide and for the pre-distortion of a plane wavefront at the input of radiation into a curved waveguide.

Keywords: AR glasses, Curved waveguide, Diffractive optical elements (DOE), Holographic optical elements (HOE).