Оптический журнал

Голография

УДК 681.7.013.82

Методика расчета голограммного дисплея с учетом дифракционной эффективности объемно-фазовой голограммы

© 2020 г.
И. А. Гуськов*, **, аспирант; Э. Р. Муслимов**, канд. техн. наук; А. Н. Мельников*, канд. техн. наук; А. Р. Гильфанов*, **, аспирант

*Государственный институт прикладной оптики, Казань

**Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

Поступила в редакцию 23.04.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-11-21-30

Развита методика расчета оптических схем голограммных дисплеев. Методика подразумевает одновременную оптимизацию показателей качества изображения и среднеквадратических значений дифракционной эффективности голограммы в контрольных точках. Методика реализована на уровне конкретных программных инструментов и использована для расчета демонстрационной схемы волноводного голограммного дисплея. Дисплей работает в спектральном диапазоне 480–620 нм, имеет угловое поле 10° и диаметр выходного зрачка 10 мм. Ввод и вывод излучения в волноводную пластину осуществляются с помощью дифракционных элементов, работающих в проходящем свете. При этом выводной элемент представляет собой объемно-фазовую голограмму, записанную двумя точечными источниками. По результатам расчетов показано, что применение предложенной методики позволяет уменьшить радиус пятна рассеяния в угловой мере на 0,28–0,97′. При этом дифракционная эффективность выводной голограммы ближе к целевому значению на 2,5–19%.

Ключевые слова: *наголовный дисплей, дополненная реальность, объемно-фазовая голограмма, дифракционная эффективность, качество изображения.*

Коды OCIS: *050.2065, 230.1950, 090.2820*

ВВЕДЕНИЕ

Существуют несколько подходов к реализации систем дополненной реальности монокулярного и бинокулярного типов. Технические решения этих двух типов предусматривают совмещение синтезированных изображений с окружающей сценой с помощью призменной системы ввода [1], светоделителя [2] или дихроичного покрытия, наносимого на вогнутую поверхность сложной формы [3]. Альтернативным решением является использование волноводного дисплея для передачи синтезированного изображения [4]. Ввод и вывод излучения в волновод в этом случае могут осуществляться с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ). К главным преимуществам таких систем можно отнести простоту конструкции и возможность согласования со зрачком глаза наблюдателя в произвольном положении за счет разделения пучков, однако существует проблема яркостных характеристик таких систем, которая в первую очередь зависит от распределения эффективности ДОЭ по полю зрения во всем рабочем спектральном диапазоне. В настоящей работе рассматриваются вариант построения волноводного

дисплея с использованием голограммных решеток и последующая оптимизация их параметров для получения баланса между требуемым качеством изображения и дифракционной эффективностью (ДЭ) голограммных элементов [5, 6].

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В настоящей работе рассматривается волноводный дисплей монокулярного типа. Существует множество вариантов таких систем дополненной реальности [5–9]. В работе [7] изложен анализ ряда подобных систем и представлены общие требования к ним. В публикации [9] продемонстрированы преимущества волноводного дисплея с пропускающим ДОЭ для ввода и вывода излучения. Далее рассматривается аналогичная оптическая система, общий вид которой представлен на рис. 1.

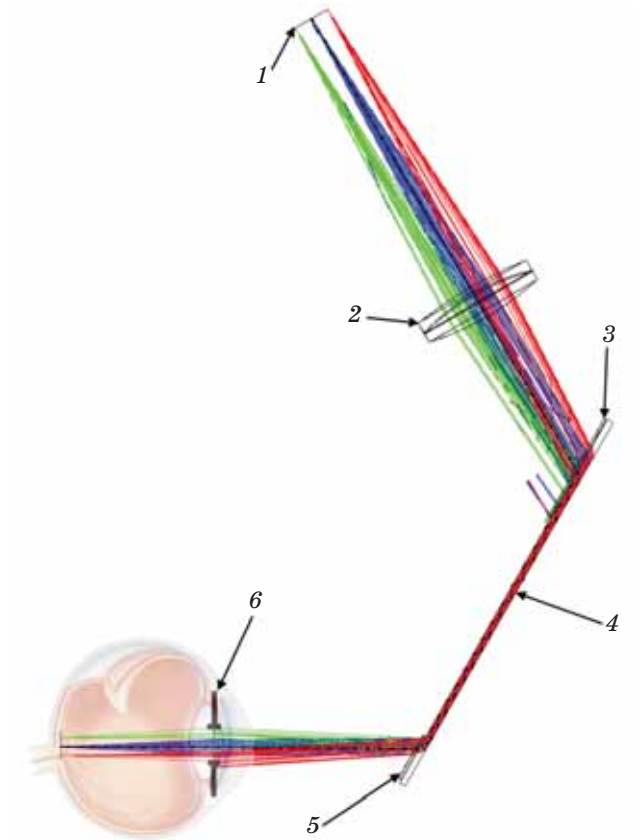

Рис. 1. Общий вид оптической схемы дисплея. *1* — излучающая матрица, *2* — коллимирующий объектив, *3* — вводной ДОЭ, *4* — волноводная пластина (тело волновода), *5* — выводной ДОЭ, *6* — выходной зрачок системы (зрачок глаза).

Излучение матрицы проходит через коллимирующий объектив, вводится в волноводную пластину с помощью первого ДОЭ, распространяется внутри волноводной пластины за счет полного внутреннего отражения (ПВО), выводится с помощью второго ДОЭ, поступая в зрачок глаза.

В случае если ДОЭ представляет собой объемно-фазовую голограмму, можно достичь высокой максимальной ДЭ и/или расширить возможности управления спектральной зависимостью ДЭ. Если при этом голограмма записывается с использованием волновых фронтов, отличных от плоских, ее аберрационными свойствами можно управлять, внося дополнительную коррекцию. Однако реализация преимуществ подобного голограммного элемента в конкретной схеме требует внесения изменений в методику ее расчета.

Углы падения в схеме записи и работы голограммы влияют как на аберрационные свойства голограммы, так и на ее ДЭ. Учет их влияния осложняется изменением углов по полю зрения, рабочему спектральному диапазону, а также по апертуре. Соответственно предлагаемая методика расчета базируется на интеграции расчета ДЭ в процесс расчета и оптимизации оптической системы дисплея путем трассировки лучей. Ранее аналогичный подход был успешно применен при расчете схем спектрографов [10].

Алгоритм расчета в упрощенном виде представлен на блок-схеме (рис. 2).

Исходными данными для расчета являются рабочий спектральный диапазон, угловое поле зрения, размеры излучающей матрицы, диаметр зрачка и материал волноводной пластины. Из условия ПВО в волноводной пластине определяются параметры вводного ДОЭ — частота штрихов N, углы падения и дифракции φ и φ'. Здесь и далее предполагается, что частота штрихов обеих голограмм одинакова. Далее определяются углы падения в схеме записи, при которых обеспечивается требуемая частота штрихов и выполняется условие Брэгга для средней длины волны диапазона λ_0, т.е. выполняются соотношения

$$90^\circ - \frac{1}{2}\left[\arcsin\left(\frac{\sin i_1}{n}\right) + \arcsin\left(\frac{\sin i_2}{n}\right)\right] = \theta, \quad (1)$$

$$2\cos(\varphi - \theta) = N\lambda_0, \quad (2)$$

$$\sin i_1 - \sin i_2 = \lambda_w N. \quad (3)$$

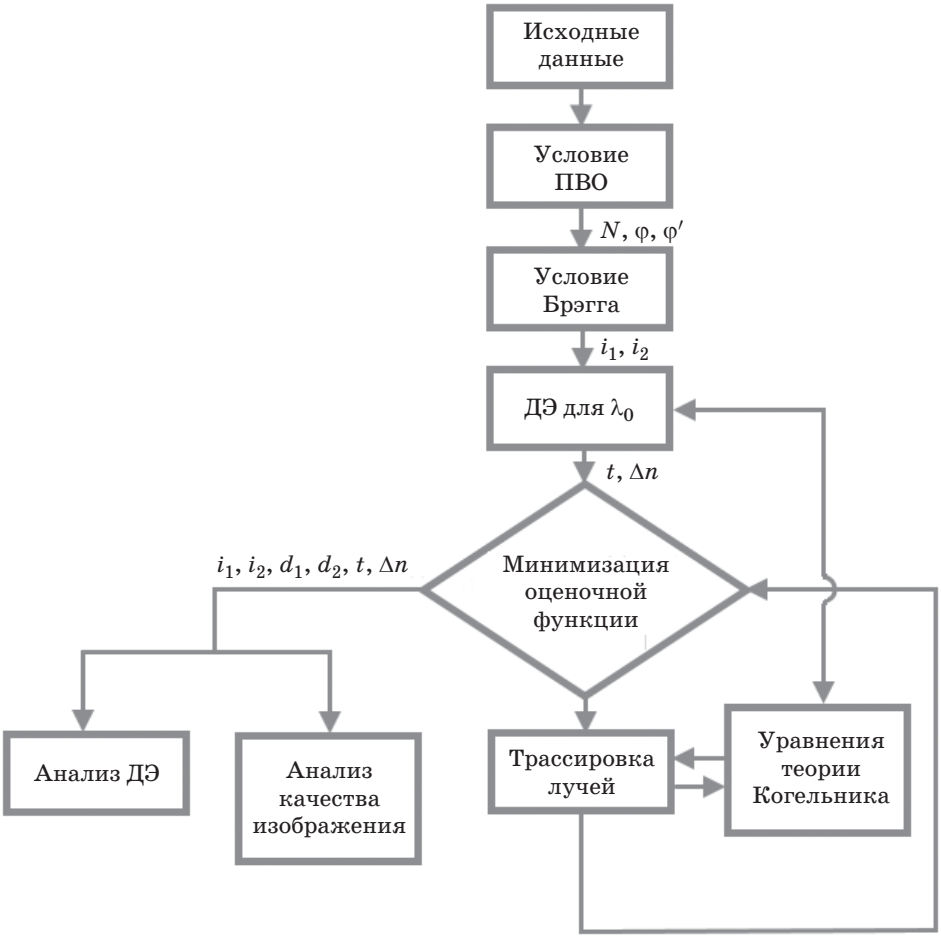

Рис. 2. Алгоритм расчета оптической схемы дисплея (буквенные обозначения расшифрованы в тексте).

Здесь n — показатель преломления подложки, θ — угол наклона полос, i_1 и i_2 — углы падения в схеме записи, λ_w — длина волны записи.

Далее из условия обеспечения требуемой ДЭ на средней длине волны рассчитываются параметры голографической структуры — толщина t и амплитуда модуляции показателя преломления Δn. Здесь и далее для расчета ДЭ используются соотношения теории связанных волн Когельника [11]. Без учета поглощения и френелевских потерь ДЭ в проходящем свете равна

$$\eta_\tau = \sin^2 \psi_1, \tag{4}$$

где ψ_1 — амплитуда фазовой модуляции определяется из выражения

$$\psi_1 = \frac{\pi \Delta n t}{\lambda_w \cos\varphi}. \tag{5}$$

Далее проводится численная оптимизация всей системы. Свободными параметрами являются параметры записывающих волновых фронтов, например, через полярные координаты источников записи (i_k, d_k), конструктивные параметры коллимирующего объектива, а также толщины и глубины модуляции объемно-фазовой голограммы. В качестве граничных условий используются максимальные углы в схеме работы (для соблюдения условия ПВО) и записи (для ограничения дисперсии на выходе голограммы), а также технологически реализуемые значения параметров голографической структуры. Целевыми функциями являются геометрические аберрации системы и отклонение ДЭ голограммы от требуемого значения. Расчет ДЭ проводится по формулам теории Когельника (4), (5) для массива лучей. Входной зрачок системы заполняется лучами в узлах сетки. В каждой точке определяются углы падения в схеме записи, рассчитываются

частота штрихов и наклон полос, а также угол падения в схеме работы. Вычисляется среднеквадратическое значение ДЭ по зрачку. Расчет повторяется для набора контрольных длин волн и для нескольких точек поля зрения.

В результате оценочная функция имеет вид

$$f=\sum_{j=1}^{k} w_{1j}\delta y'_j+\sum_{j=1}^{k} w_{2j}\Delta\beta'_j+ \\ +\sum_{j=1}^{k} w_{3j}\left|\sigma^*-\sigma_j(\eta)\right|+g_1(t)+g_2(\Delta n), \quad (6)$$

где w_{ij} — весовые коэффициенты, $\delta y'_j$ — аберрации системы, $\Delta\beta'_j$ — угловые величины системы (условия ПВО, углы дифракции, углы в схеме записи), $\sigma_j(\eta)$ — среднеквадратическая ДЭ, σ^* — целевое значение ДЭ, $g_1(t)$ — штрафная функция, ограничивающая толщину голограммы, $g_2(\Delta n)$ — штрафная функция, ограничивающая глубину модуляции.

Далее рассматривается применение описанной методики при расчете конкретной схемы голограммного дисплея.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И НАЧАЛЬНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

В рассматриваемом демонстрационном примере сделан ряд упрощений. Ввод излучения осуществляется с помощью классической дифракционной решетки, ее параметры при оптимизации не изменяются. Для вывода излучения используется объемно-фазовая голограмма с коррекцией аберраций. Именно ее параметры рассчитываются и оптимизируются в соответствии с описанной выше методикой. Предполагается, что голограмма записывается двумя точечными когерентными источниками. Принципиальная схема записи голограммы представлена на рис. 3. В случае если расчетные расстояния до источников записи значительны, схема записи может быть реализована с помощью коллиматоров с расчетной дефокусировкой (обозначена пунктиром).

Диаметр выходного зрачка системы принят равным 10 мм. Выходной зрачок должен быть согласован со зрачком глаза наблюдателя, следовательно, удаление выходного зрачка коллимирующего объектива должно составлять не менее 30 мм. Угловое поле 2ω в демонстрационном варианте схемы ограничено 10° с

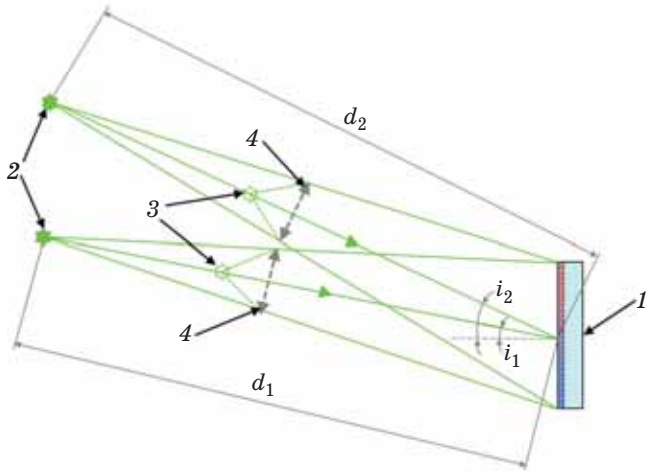

Рис. 3. Схема записи выводной голограммы. *1* — подложка, *2* — расчетные положения точечных источников, *3* — возможные положения реальных источников, *4* — коллимирующие объективы.

целью упрощения конструкции коллиматора и уменьшения световых диаметров его линз, а также ограничения изменения угла падения излучения на голограмму.

Излучающая матрица представляет собой серийный OLED (*organic light-emitting diode* — органический светоизлучающий диод) микродисплей размером 1024×768 элементов с диагональю 10 мм [12]. Таким образом, фокусное расстояние коллимирующего объектива должно составлять 57,2 мм.

Целевой рабочий спектральный диапазон системы должен позволить охватить три канала RGB формируемого микродисплеем цветного изображения и при этом допускать поддержание высокой и равномерной ДЭ. Диапазон был ограничен длинами волн 480 и 620 нм, что соответствует положению максимумов яркости каналов B и R типичного OLED-дисплея [13].

При определении исходной конфигурации схемы предполагалось, что в качестве коллимирующего объектива используется несклеенный двухлинзовый объектив. Такое решение позволит максимально упростить оптическую схему, а также нагляднее продемонстрировать влияние аберраций голограммы на качество изображения.

В качестве материала волноводной пластины выбрано стекло ТК21, обладающее сравнительно высоким показателем преломления (n_d = 1,6567), что позволит уменьшить угол ПВО.

Угол ПВО выбранного материала составляет 37,13°. Наименьший угол дифракции на вводной голограмме должен превышать данное значение. Для уменьшения частоты штрихов в ДОЭ целесообразно ввести угол наклона волновода, равный 35°. Также следует учесть, что из-за угловой дисперсии ДОЭ возникает различное поперечное смещение главного луча на разных длинах волн. Графики зависимостей поперечного смещения главного луча для волновода толщиной 1 мм приведены на рис. 4.

При частоте штрихов 1060 мм$^{-1}$ условие ПВО выполняется во всех точках поля зрения и на всех длинах волн и достигается достаточное перекрытие пучков на разных длинах волн на выходе волноводной пластины.

При расчете начального приближения предполагалось, что источники записи голограммы находятся на бесконечности. Расчетная длина волны записи составляет 532 нм. Углы падения на подложку в схеме записи, найденные из условия Брэгга, составляют 25,36 и 82,84°.

При оптимизации ДЭ голограммы целесообразно ее целевое значение приравнять 50% по всему полю зрения в рабочем спектральном диапазоне. В этом случае будет обеспечена высокая и равномерная яркость синтезированного изображения и минимизированы искажения воспроизведения цвета в канале прямого наблюдения. В начальной конфигурации схемы это условие выполняется только на средней длине волны при толщине голограммы 5,6 мкм и глубине модуляции 0,09.

Для моделирования и оптимизации оптической схемы средствами программного пакета ZEMAX были разработаны вспомогательные программные средства, а именно, пользовательская библиотека «.dll» для задания нового типа поверхности — объемно-фазовой решетки, записываемой двумя точечными источниками, с определенной толщиной и глубиной модуляции структуры, и подпрограмма-макрос для вычисления ДЭ по сетке 51×51 лучей, покрывающих входной зрачок, и определения среднеквадратического значения по массиву.

Здесь и далее все вычисления проводились для трех контрольных длин волн — центра и краев рабочего диапазона, а также для сетки точек 3×3, покрывающей поле зрения дисплея. Для анализа достигнутого качества изображения используются точечные диаграммы (рис. 5).

Значения радиусов полученных точечных диаграмм в угловой мере сведены в табл. 1.

Распределение ДЭ выводной голограммы по апертуре, вычисленное с помощью разработанных программных средств, представлено на диаграммах рис. 6, численные значения ДЭ сведены в табл. 2.

Полученные данные демонстрируют, что рассчитанная исходная конфигурация системы позволяет получить сравнительно высокое качество изображения по всему полю зрения,

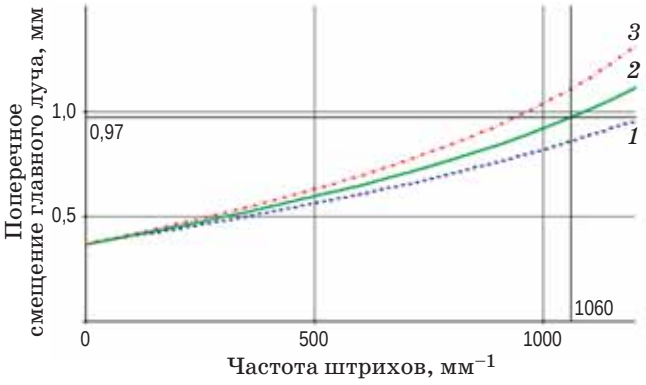

Рис. 4. Зависимости поперечного смещения главного луча от частоты штрихов и длины волны (*1* — 480, *2* — 550, *3* — 620 нм).

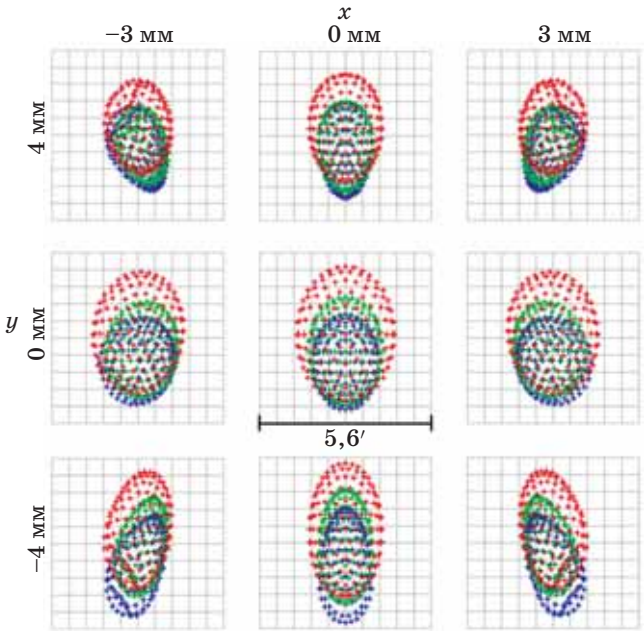

Рис. 5. Точечные диаграммы системы в исходной конфигурации.

однако ДЭ объемно-фазовой голограммы значительно варьируется как по полю зрения, так и по длинам волн. Также можно отметить, что изменение ДЭ по зрачку для каждого пучка сравнительно невелико, что позволяет увеличить шаг выборки при оптимизации и снизить требования к вычислительным ресурсам.

Таблица 1. Радиусы точечных диаграмм (в угловой мере) системы в исходной конфигурации

Способ измерения	Линейное поле зрения		
	$x = -3$ мм, $y = -4$ мм	$x = 0$ мм, $y = 0$ мм	$x = 3$ мм, $y = 4$ мм
Среднеквадратический	1,15′	1,47′	1,28′
Максимальный	1,90′	2,37′	2,41′

Таблица 2. Значения ДЭ (%) системы в исходной конфигурации

Длина волны, нм	Линейное поле зрения		
	$x = -3$ мм, $y = -4$ мм	$x = 0$ мм, $y = 0$ мм	$x = 3$ мм, $y = 4$ мм
480	56,0 (2,84)	63,3 (0,02)	38,9 (1,76)
550	28,1 (3,46)	50,9 (0,02)	22,3 (2,52)
620	4,2 (1,51)	37,2 (0,08)	25,4 (3,23)

Примечание. Первое значение соответствует среднеквадратической ДЭ по зрачку, значение в скобках — максимальному отклонению от него.

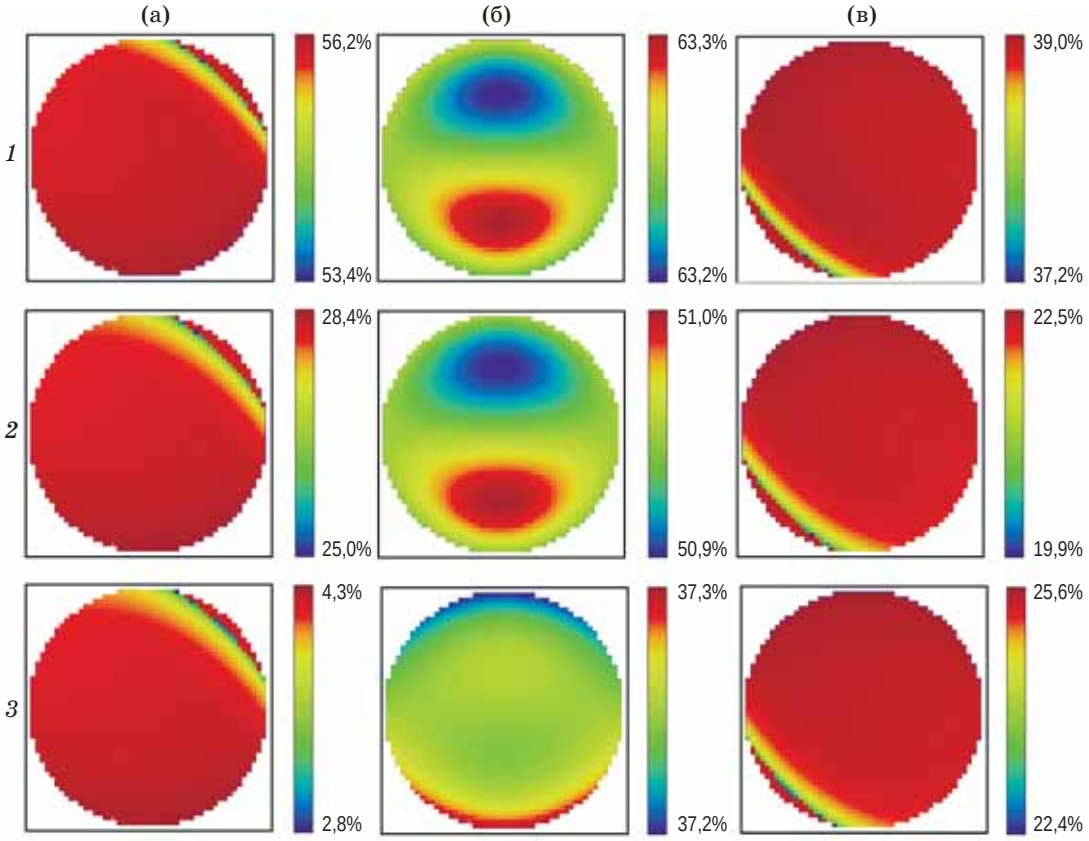

Рис. 6. Диаграммы распределения ДЭ системы в исходной конфигурации. а — $x = -3$ мм, $y = -4$ мм, б — $x = 0$ мм, $y = 0$ мм, в — $x = 3$ мм, $y = 4$ мм. *1* — 480, *2* — 550, *3* — 620 нм.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оптимизация оптической схемы дисплея проводилась в соответствии с методикой, описанной в разделе 1. Следует отдельно указать, что при назначении допустимых значений параметров голографической структуры были учтены технологические ограничения, известные из литературы [14], а также значение параметра Клейна [15].

В результате оптимизации конструктивные параметры коллимирующего объектива практически не изменились. Найденные полярные координаты источников записи выводной голограммы соответствуют (21,88°, 58,2 м) и (69,47°, 106,9 м). Толщина структуры составила 3,7 мкм, глубина модуляции — 0,14.

Точечные диаграммы системы после оптимизации приведены на рис. 7, а соответствующие численные значения — в табл. 3.

Распределение ДЭ выводной голограммы по апертуре демонстрирует рис. 8, а соответствующие значения сведены в табл. 4.

Приведенные данные указывают, что среднеквадратические значения радиуса точечных диаграмм сократились на 0,28–0,97′. В сравнении с угловой разрешающей способностью глаза такое изменение можно считать заметным. Одновременно с этим распределения ДЭ по рабочему спектральному диапазону и полю зрения приблизились к желаемым. Наиболее значительный эффект достигнут на длинноволновом крае диапазона и для углов поля зрения — до 19%. При этом также уменьшилось изменение ДЭ по зрачку. Важно отметить, что указанные результаты достигнуты без введения в систему дополнительных элементов или коррекционных параметров.

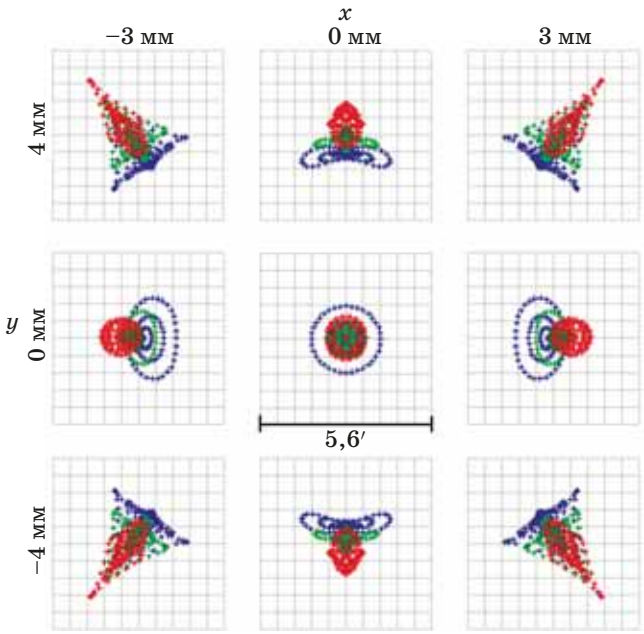

Рис. 7. Точечные диаграммы системы после оптимизации.

Таблица 3. Радиусы точечных диаграмм (в угловой мере) системы после оптимизации

Способ измерения	Линейное поле зрения		
	$x = -3$ мм, $y = -4$ мм	$x = 0$ мм, $y = 0$ мм	$x = 3$ мм, $y = 4$ мм
Среднеквадратический	0,87′	0,50′	0,84′
Максимальный	2,21′	1,14′	2,11′

Таблица 4. Значения ДЭ (%) системы после оптимизации

Длина волны, нм	Линейное поле зрения		
	$x = -3$ мм, $y = -4$ мм	$x = 0$ мм, $y = 0$ мм	$x = 3$ мм, $y = 4$ мм
480	60,6 (0,59)	69,2 (0,02)	58,0 (0,48)
550	43,6 (0,69)	53,4 (0,04)	34,7 (0,68)
620	23,1 (0,77)	44,9 (0,01)	29,2 (0,73)

Примечание. Первое значение соответствует среднеквадратической ДЭ по зрачку, значение в скобках — максимальному отклонению от него.

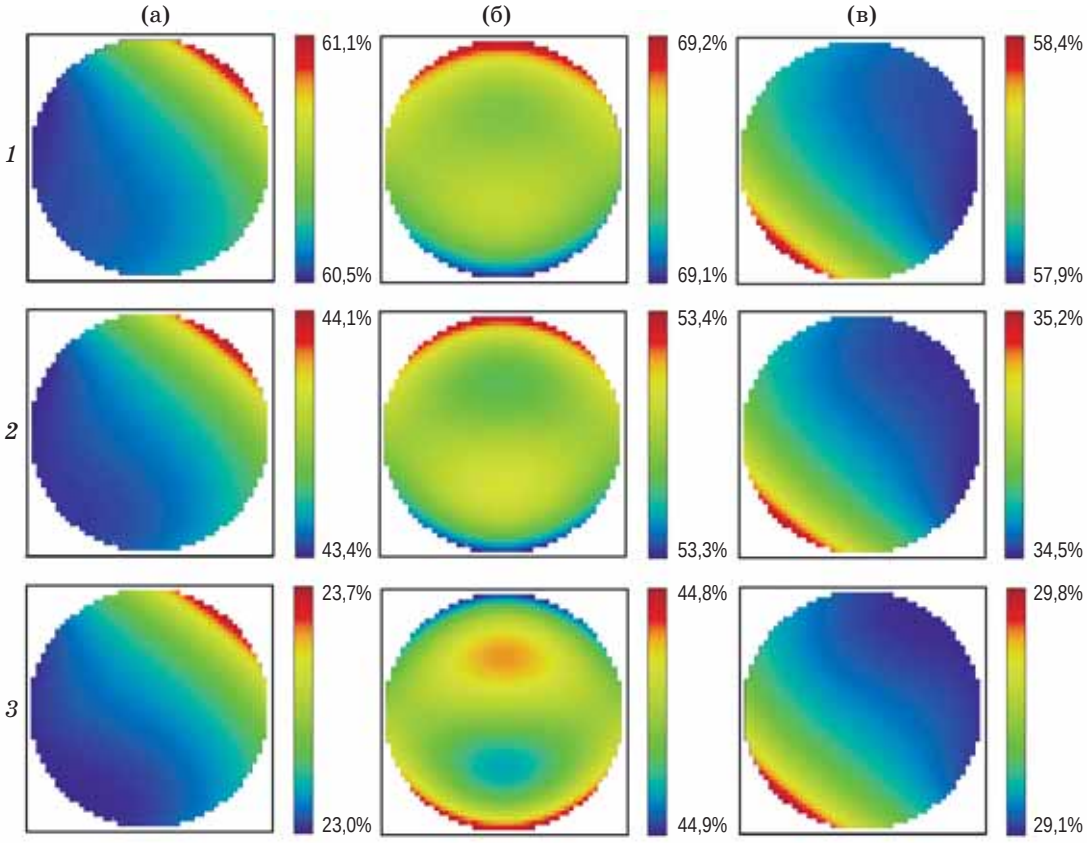

Рис. 8. Диаграммы распределения ДЭ системы после оптимизации. а — $x = -3$ мм, $y = -4$ мм, б — $x = 0$ мм, $y = 0$ мм, в — $x = 3$ мм, $y = 4$ мм. *1* — 480, *2* — 550, *3* — 620 нм.

4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Представленный выше демонстрационный пример показал, что предложенная методика расчета позволяет одновременно контролировать ДЭ объемно-фазовой голограммы и качество изображения системы. Практика реализации данной методики указывает на следующие перспективные направления дальнейших исследований.

1. Трассировка лучей через разработанную систему в непоследовательном режиме (рис. 9а) показывает, что существуют риски прямой засветки глаза наблюдателя внешним источником через голограмму, а также формирования блика при выходе излучения из торцевой поверхности покровного стекла. Были проведены предварительные оценки с введением в систему двух источников, аналогичных лабораторным имитаторам Солнца [16], установленным под углом ±30° к линии визирования. Как показали результаты моделирования, в такой схеме не формируются концентрированные блики вблизи глаза наблюдателя, а уровень рассеянного света на три порядка ниже освещенности изображения (см. рис. 9б). Однако распространение рассеянного света и формирование бликов в системе требуют отдельного подробного исследования.

2. В данном случае рассматривалась простейшая конфигурация схемы записи голограммы. В дальнейшем целесообразно расширить разработанную методику на голограммы, записываемые с помощью вспомогательных оптических элементов.

3. В представленном расчете виньетирование системы подробно не рассматривалось. Однако в реальной системе будет наблюдаться виньетирование, обусловленное изменением размера диаметра зрачка глаза, учет которого также требует дополнительных исследований.

4. В настоящей работе не рассматривались требования к точности практической реализации расчетных параметров. Расчет чувствительности основных характеристик к из-

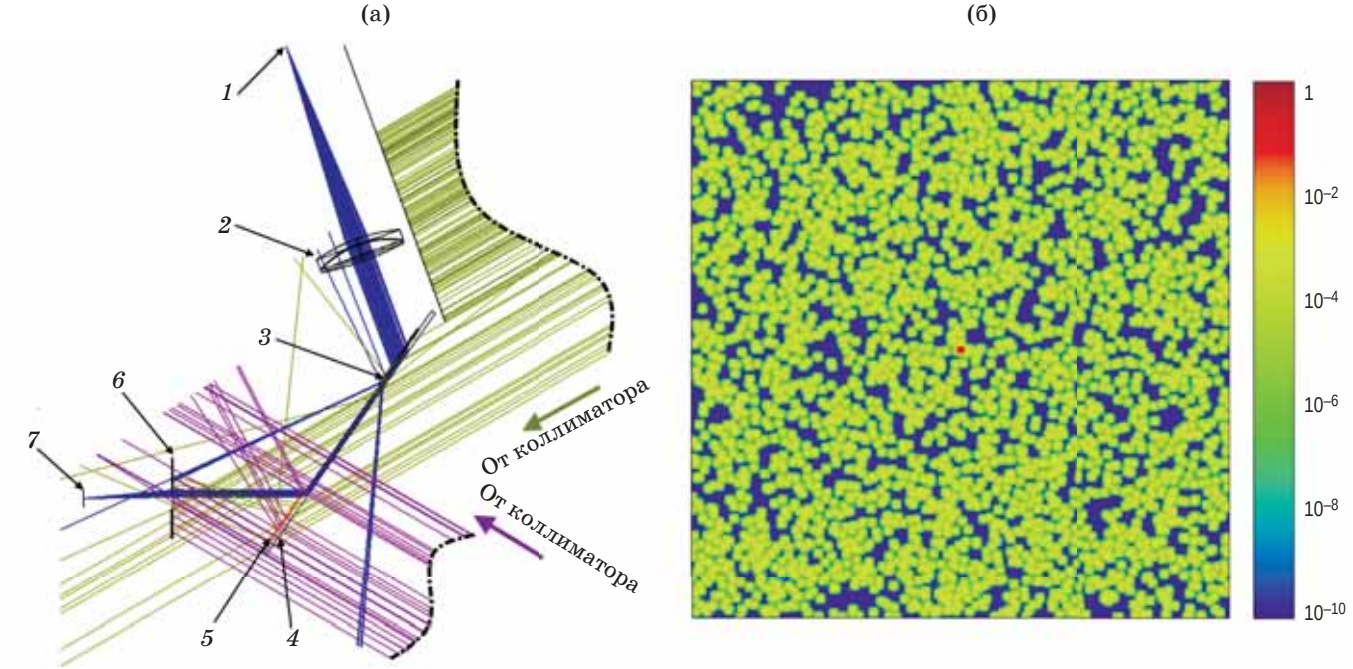

Рис. 9. Предварительное моделирование солнечной засветки. а — трассировка лучей в непоследовательном режиме (*1* — тестовый точечный источник, *2* — коллимирующий объектив, *3* — вводной ДОЭ, *4* — волноводная пластина (тело волновода), *5* — выводной ДОЭ, *6* — зрачок глаза, *7* — плоскость изображения), б — распределение освещенности в плоскости изображения (используется логарифмический масштаб и сглаживание данных).

менению конструктивных и технологических параметров и определение допусков на них также требуют отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе развита методика расчета схемы волноводного дисплея с пропускающей объемно-фазовой голограммой, основанная на одновременной оптимизации аберраций и дифракционной эффективности голограммы.

Предложенная методика реализована на уровне отдельных программных инструментов и использована для расчета и оптимизации демонстрационной схемы дисплея монокулярного типа. Показано, за счет использования данной методики удается уменьшить среднеквадратический радиус пятна рассеяния в угловой мере на 0,28–0,97′. При этом за счет включения среднеквадратических значений дифракционной эффективности в оценочную функцию удается контролировать дифракционную эффективность во всем рабочем диапазоне и повысить его минимальное значение на 19%, значительно увеличив равномерность дифракционной эффективности как по полю зрения, так и по спектральному диапазону. При этом в систему не вводятся новые компоненты или свободные коррекционные параметры.

Таким образом, разработанная методика эффективна при решении задач повышения качества изображения и равномерности дифракционной эффективности голограммных дисплеев. Программные инструменты, реализующие ее, позволяют проводить все расчеты в единой среде и обеспечивают значительную гибкость проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chen B.* A reflective prism for augmented reality with large field of view // Proc. SPIE. 2018. V. 10676. P. 106760X-1–106760X-4.
2. *Власов Е.В., Патерикин В.И.* Оптико-информационные системы коллаборации на основе объёмной виртуальной среды и физической реальности // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 972–975.

3. *Wei L., Li Ya., Jing J., Feng L., Zhou J.* Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface // Opt. Exp. 2018. V. 26. № 7. P. 8550–8565.
4. *Rolland J.P., Thompson K.P., Bauer A., Urey H., Thomas M.* See-through head-worn display (HWD) architectures // Handbook of Visual Display Technology / Ed. by Chen J., Cranton W., Fihn M. Springer, Cham, 2016. P. 2929–2961.
5. *Liu Z., Pang Ya., Pan C., Huang Zh.* Design of a uniform-illumination binocular waveguide display with diffraction gratings and freeform optics // Opt. Exp. 2017. V. 25. № 24. P. 30720–30731.
6. *Yu C., Peng Yi., Zhao Q., Li H., Liu X.* Highly efficient waveguide display with space-variant volume holographic gratings // Appl. Opt. 2017. V. 56. № 34. P. 9390–9397.
7. *Perriere V.B.* Understanding waveguide-based architecture and ways to robust monolithic optical combiner for smart glasses // Proc. SPIE. 2018. V. 10676. P. 106761D-1–106761D-8.
8. *Романова Г.Э., Корешев С.Н., Сидоренко В.С.* Расчет и моделирование световодной системы дополненной реальности на базе голографических элементов // HOLOEXPO 2019. XVI Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов / МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «МНГС». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 143–146.
9. *Град Я.А., Николаев В.В., Одиноков С.Б., Соломашенко А.Б.* Индикатор дополненной реальности на основе световодной пластины с пропускающими ДОЭ // Голография. Наука и практика: XIV Междунар. конф. HOLOEXPO 2017: Тезисы докладов / МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «МНГС». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 133–137.
10. *Муслимов Э.Р., Павлычева Н.К.* Комплексное использование методов анализа связанных волн и трассировки лучей при проектировании спектрографов с объёмно-фазовыми решётками // HOLOEXPO 2019: XVI Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов / МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «МНГС». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 323–330.
11. *Kogelnic H.* Coupled wave analysis for thick hologram gratings // Bell Syst. Tech. J. 1969. V. 48. P. 2909–2947.
12. Sony ECX334a OLED Microdisplay [Электронный ресурс] / Sony Semiconductor Solutions Corporation. — Электрон. дан. — [Kanagawa, Japan], cop. 2019. — режим доступа: https://www.sony-semicon.co.jp/products_en / micro_oled, свободный. — Загл. с экрана. — Яз.анг. — (Проверено: 06.07.2019).
13. *Ghosh A., Donoghue E.P., Khayrullin I., Ali T., Wacyk I., Tice K., Vazan F., Szilkas L., Fellowes D., Draper R.* Directly patterened 2645 PPI full color OLED microdisplay for head mounted wearables // SID Symp. Digest of Technical Papers. 2016. P. 47.
14. *Blanche P.A., Gailly P., Habraken S., Lemaire P.C., Jamar C.* Volume phase holographic gratings: Large size and high diffraction efficiency // Opt. Eng. 2004. V. 43. № 11. P. 2603.
15. *Caulfield H.J.* Handbook of optical holography. NY: Academic Press, 1979. 654 p.
16. Имитатор Солнца ИС-100 [Электронный ресурс] / ООО «ОПТОТЕХНИКА». — Электрон. дан. — [СПб], cop. 2020. — режим доступа: https://optotekhnika.ru/pr/solar/is100/, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус. — (Проверено: 01.04.2020).