

УДК 535.317:771.351.7

Оценка оптимальных возможностей кабиной однокомпонентной индикаторной системы отображения вторичной информации

© 2019 г. **А. А. Багдасаров***, канд. техн. наук;
О. В. Багдасарова**, канд. техн. наук; **В. А. Барышев****, магистр

*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

**Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: balexol@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.02.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-06-11-19

Рассмотрены особенности кабинных однокомпонентных индикаторных систем отображения вторичной информации, впервые исследованы их оптимальные характеристики. Выявлены возможности их совершенствования. Исследовано влияние асферизации системы на качество изображения, а также действие параллактических искажений при наблюдении.

Ключевые слова: отображение вторичной информации, комбинер, дисплей, угловое поле, зрачковая зона, параллакс, дисторсия.

Коды OCIS: 120.4820, 2203620.

В [1–6] были рассмотрены в ретроспективном плане тенденции развития систем управления движением воздушного, морского и наземного транспорта, комплексов обеспечения безопасности и мониторинга окружающего пространства. В частности, проанализированы особенности применения кабинных индикаторных систем отображения вторичной информации (в англоязычной литературе HUD или Head-up-Display, то есть дисплеев, в которые смотрят с поднятой головой, не опуская взгляд на приборную панель), сформулированы и систематизированы композиционные и технические требования к системам отображения и их элементам. Определены характер и направления развития кабинных индикаторов коллиматорного типа комплексов авионики и средств автобазирования. Представлено большое количество схемных и композиционных решений с использованием современных функциональных узлов. В [1] изложен ряд ключевых требований к системам отображения вторичной информации, в общем виде проиллюстрирована методика расчёта оптики таких систем с применением электронной компенсации дисторсии в случае работы с боль-

шими для таких систем угловыми полями зрения (более 15°).

Необходимо напомнить, что в системах отображения вторичной информации передаваемое наблюдателю (пилоту, водителю, оператору и т. п.) изображение накладывается непосредственно на видимую обстановку, но должно чётко различаться на её фоне. Сложение изображений осуществляется за счёт светоделительного оптического элемента, называемого комбинером. Важно, чтобы комбинер обладал высоким значением интегрального коэффициента пропускания светового потока (порядка 80%) и обеспечивал наблюдение информационного изображения на фоне окружающей обстановки без существенного ослабления. В то же время яркость информационного изображения должна быть достаточной для наблюдения.

В системе HUD существует некоторая область в пространстве, из которой всё поле зрения канала индикации должно быть видимо при наблюдении двумя глазами. Желательно, чтобы эта область имела возможно большие размеры и была расположена вокруг комфортного положения глаз наблюдателя. Практически размер области

наблюдения (выходного зрачка) в индикаторных системах комплексов авионики достигает величины порядка $120 \times 90 \text{ мм}^2$. Как показано в вышеприведённых работах [1–6], оптические системы для ввода в поле зрения наблюдателя рабочей информации через светоделительные элементы могут строиться на базе линзовых (зеркально-линзовых) элементов или же их комбинации с голограммными элементами, в большинстве своём реализованными в системе комбинера, что в настоящее время практически превалирует в патентной литературе.

Следует сказать, что, как правило, оптические системы HUD, работающие со светоделительными компонентами при значительных полях, относятся к классу систем с децентрированными элементами, т.е. систем с внеосевым смещением линз или групп линз, заклоном (разворотом) некоторых поверхностей или линз. Кроме того, в оптических системах HUD с большими полями зрения по определению существует наклон изображения. Это приводит к необходимости в ряде случаев ещё и разворота излучающей поверхности матрицы.

В работе [1] сказано, что устройства отображения вторичной информации, зародившись в авиации, с начала 2000-х годов реально стали устанавливаться на представительских автомобилях иностранных марок. Причём идеологически большинство устройств напоминает схемы авиабазирования и так же размещаются над головой или в пространстве приборной панели.

Следует сказать, что HUD авиабазирования, являясь системами, композиционно значительно сложнее систем HUD автобазирования, несут функционально гораздо более сложную нагрузку при большем угловом поле (до 40°) и более высокой светосиле и, естественно, должны удовлетворять более жёстким требованиям к качеству изображения.

В то же время, как правило, существующие простейшие системы HUD, устанавливаемые на приборной панели и имеющие один оптический элемент, квалифицируются как автосопутствующие товары и выполняют в основном функцию навигатора. Вместе с тем следует, однако, признать, что стационарные устройства отображения вторичной информации автобазирования при меньшем количестве элементов по сравнению с HUD авиабазирования композиционно являются достаточно простыми системами, содержащими сложные функциональные узлы.

Так, согласно конфигуратору на официальном сайте автостроительной корпорации BMW [7] стоимость HUD совместно с навигационной системой Professional с жёстким диском и пакетом услуг BMW Connected Drive составляет в российских рублях от 300 000 руб. до 400 000 руб. (в ценах 2018 г.).

Высокая стоимость устройства определяется дороговизной составляющих её элементов и, в первую очередь, трёх децентрированных зеркал с асферическими отражающими поверхностями высокого порядка, размещённых в пространстве внутри приборной панели. Совместно с лобовым стеклом, форма внутренней и внешней поверхностей которого, как правило, в первом приближении является торической, линзовым защитным элементом (возможно и асферическим) между пространством автосалона и внутренним пространством приборной панели они составляют композицию оптической схемы такого устройства для отображения вторичного изображения. Следует отметить, что форма лобовых стёкол каждой отдельной модели может быть индивидуальной.

В ряде случаев для устранения бликов пластиковый слой в триплексе выполнен призматическим [8].

Необходимо упомянуть, что, как правило, каждая компания-производитель имеет свой самостоятельный ряд форм лобовых стёкол.

В подобных системах, как показали экспертные расчёты систем такого рода композиций, угловое поле зрения весьма невелико и для прямоугольного изображения не превышает $4,5 \times 2,5^\circ$ при линейном увеличении порядка $3^x - 4^x$. Видимое увеличение, как правило, меньше 1^x . Размеры зрачковой зоны в окрестностях лица водителя достаточно большие и достигают величины порядка $300 \times 300 \text{ мм}^2$.

Поэтому трудно признать такой вариант комплектации оптимальным и экономически легкодоступным. Но, возможно, он приемлем для дорогостоящих автомобилей.

В связи с этим в мире появилось большое количество простых устройств отображения вторичной информации в пределах небольших угловых полей зрения с достаточно удовлетворительным качеством изображения, в частности HUD с однокомпонентным оптическим элементом, применяемым для управления движением не только в наземном транспорте.

На рис. 1 представлено фото HUD надголовного размещения в салоне автомобиля с однокомпонентным комбинером [9]. Одним из главных достоинств данного аппарата можно назвать его удобное крепление в салоне: дисплей прикрепляется к солнцезащитному козырьку над рулем. Компания «Pioneer» использовала здесь DLP-проектор, который формирует изображения высокой контрастности и цветовой насыщенности, создаёт визуальный эффект экрана в 30 дюймов, который расположен всего в трёх метрах перед водителем. Дисплей совместим практически со всеми смартфонами, которые можно подключить через USB-разъём и, загрузив необходимым приложением, использовать в управлении движением автомобиля.



Рис. 1. Проекционный дисплей «Navgate HUD srx-hud01» компании Pioneer для автомобильной навигации с использованием смартфона.

Известны и другие конструкции подобных HUD, крепление которых производится в ином месте над головой водителя

Очевидно, что в таких устройствах более нет оптических элементов, т.к., если бы их было больше и размещались бы они, например, в корпусе до комбинера, то размеры корпуса были бы значительны, и соответствовали бы размерам HUD авиабазирования, рассмотренного, например, в [10].

Несмотря на значительную распространённость подобных устройств, однозначного ответа на вопросы, касающиеся их тактико-технических характеристик, в литературных источниках обнаружить не удалось.

Это вопросы об оптимальном соотношении углового поля и размеров зрачковой зоны, о значениях параллактических искажений в их пределах, о величине видимого увеличения при достигнутом линейном увеличении в оптимальных эргономических границах, о влиянии асферизации, а также разворота комбинера на качество изображения и т.д.

Вместе с тем, необходимость освещения поставленной темы диктуется как академическим интересом, так и потребностью производства и внедрения устройств рассматриваемого типа во всевозможные системы управления движением различных носителей.

В связи со сказанным сформулированные вопросы рассмотрены авторами в настоящей статье путём исследований, базирующихся на среднестатистических условиях работы надголовного HUD наземного базирования.

Итак, применительно, в первую очередь, к автомобилю (хотя однокомпонентные HUD могут использоваться и в системах авиа и иного базирования) и, исходя из эргономических соображений,

элементы надголовного HUD следовало бы разместить следующим образом:

1. Дисплей смартфона или другую излучающую площадку расположить выше глаз водителя по центру системы примерно на 200–300 мм при среднестатистическом расстоянии от глаз наблюдателя до его макушки порядка 130 мм [11].

2. Комбинер со светоделительным покрытием не должен находиться на близком расстоянии от лица водителя. В ряде случаев его крепят на лобовое стекло. Расстояние от комбинера до глаз водителя (зрачковой зоны) примерно от 400 до 600 мм.

3. В автомобиле при использовании HUD-системы было бы целесообразным создавать мнимое изображение в районе капота или на большем расстоянии в поле зрения водителя. По рекламным источникам это расстояние колеблется от 1,5 до 5–6 м от лица водителя. Однако наиболее правильным было бы считать эту величину от 5–6 м, поскольку в процессе движения автомобиля именно на это расстояние на дороге, как правило, аккомодирует глаз водителя при управлении автомобилем. Водитель чётко видит дорогу перед собой и, кроме того, в процессе движения легко переаккомодируется на бесконечность из-за малости объёма аккомодации (порядка 0,2 диоптрии).

Следует сказать, что в системах HUD авиабазирования наблюдаемое пилотом виртуальное изображение всегда ориентировано на бесконечность.

4. Разъединение формирующего изображение и наблюдательного каналов производится разворотом комбинера вокруг вершины вогнутой поверхности, на которую нанесён светоделительный слой. Необходимо отметить, что спектральные диапазоны излучения генераторов изображений современных HUD ограничиваются в основном зелёной или оранжевой областью с полушириной спектра 8–12 нм. Таким образом, полоса пропускания комбинера теряет лишь часть цвета, и изображение ландшафта видится в цвете, но только с некоторым незначительным посерением.

Эти моменты обеспечивают высокие значения интегрального коэффициента отражения и пропускания световых потоков комбинером, но неизбежно приводят к необходимости формирования его светоделительного слоя из 25–30 и более диэлектрических покрытий.

Воспользовавшись в первом приближении формулами идеальной оптической системы [12], нетрудно определить параметры однокомпонентной системы, состоящей из менисковой линзы с первой светоделительной поверхностью, обращённой вогнутостью к наблюдателю и излучающему дисплею. Радиус второй, преломляющей, поверхности комбинера для обеспечения афокальности системы в проходящем ходе световых лучей, как правило, ненамного должен отличаться от значения радиуса первой поверхности комбинера.

Поэтому на предварительном этапе расчёта его можно не принимать во внимание.

Предварительные значения фокусного расстояния f' и радиуса R светоделительной поверхности при выбранных расстояниях от комбинера до излучающей площадки $s = -500$ мм и от комбинера до мнимого изображения объекта, воспроизводимого на излучающей площадке $s' = 5000$ мм, будут определяться выражениями

$$f' = \frac{s's}{s'+s}, \quad (1)$$

$$R = 2f' \quad (2)$$

и будут равны $f' = -555,55$ мм, $R = -1111,11$ мм.

Полагая в системе формат экрана генератора изображения (либо дисплея смартфона) 5 дюймов (127 мм по диагонали или $110,7 \times 62,3$ мм² — при соотношении сторон 16:9), линейное увеличение в направлении от водителя по ходу движения $\beta = -s'/s = 10^{\times}$ и, исходя из формулы

$$\beta = \frac{y'}{y}, \quad (3)$$

где y и y' соответственно — размер полудиagonали дисплея и его мнимого изображения комбинером, величина изображения диагонали дисплея определится как $2y' = 1270$ мм.

Следует отметить, что в процессе оптимизации оптической однокомпонентной системы HUD этот размер, естественно, изменится, поскольку расстояние от комбинера до образованного им мнимого изображения дисплея, принятое в качестве одного из коррекционных параметров, будет меняться в процессе коррекции. Находясь в границах допуска на это расстояние (порядка $\pm 0,5$ м), необходимо придерживаться принятого соответствия между величинами s , s' , β , y и y' и z , где z — расстояние от зрачковой зоны до комбинера.

Примем, что размеры прямоугольного комбинера не должны превышать величин 190×80 мм², что по диагонали будет соответствовать 206 мм. Увеличивать размеры комбинера нецелесообразно, поскольку возрастание габаритов системы негативно скажется на её весе и эргономичности. Вес комбинера такого размера, выполненного из органического материала, будет незначительным и не отяготит конструкцию.

Необходимо помнить, что все лучи от источника изображения — смартфона или дисплея — не должны миновать комбинер.

Определение размеров зрачковой зоны следует производить, исходя из следующих соображений:

1. В данной системе материальная диафрагма отсутствует, однако, если глаза наблюдателя перемещать в горизонтальном направлении (в на-

правлении X), то, начиная с некоторого момента, один из глаз не будет видеть всё поле, и наблюдать только часть его. Это обусловлено размерами комбинера.

2. Для того, чтобы определить максимально возможный размер зрачковой зоны при условии, когда левый глаз перестанет наблюдать хотя бы 30% от всего поля, воспользуемся воображаемым перемещением, допустим, левого глаза 1 совместно с правым глазом 2 по горизонтали до положения $1'$ и $2'$, как показано на рисунке в плане (рис. 2).

В табл. 1 приведены данные по определению допустимых размеров зрачковой зоны в системе при заданных выше условиях. В левом столбце таблицы указаны значения координат левого глаза в горизонтальном направлении (по оси X), которым соответствуют ещё видимые глазом координаты половины линейного поля в пространстве мнимого изображения, приведённые в правом столбце таблицы. В соответствии с размером большей стороны дисплея, направленной вдоль оси X и равной 110,7 мм, линейным увеличением $\beta = 10^{\times}$, а также формулой (3) $X_{\max} = 554$ мм.

Для правого глаза предельный размер зрачковой зоны будет таким же, так как система симметрична.

За величину максимально допустимой величины зрачковой зоны разумно принять то положение глаз наблюдателя (левого или правого), которое

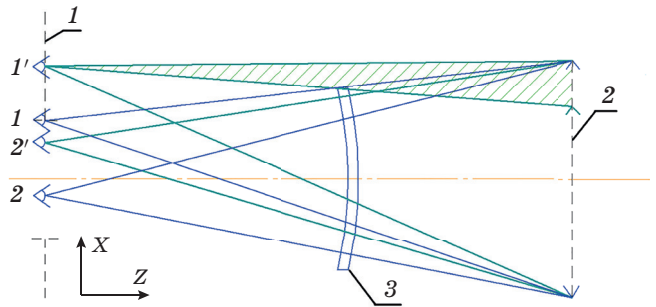


Рис. 2. Определение величины зрачковой зоны при наблюдении двумя глазами. 1 — зрачковая зона, 2 — рассматриваемое изображение, 3 — комбинер.

Таблица 1. Зависимость величины зрачковой зоны от размеров линейного поля в пространстве изображений

Предельные значения координат левого глаза по оси X , мм	Размер линейного поля в пространстве изображения по оси X , мм
145	X_{\max}
159	$0,7X_{\max}$
178	$0,3X_{\max}$
197	0

соответствует моменту исчезновения стереоскопического видения.

Как видно из табл. 1, максимально допустимое значение зрачковой зоны по оси X будет соответствовать крайнему положению левого (или правого при перемещении в противоположную сторону) глаза, при котором глаз видит только половину наблюдаемого изображения в горизонтальном направлении (левый глаз правую, правый — левую) и равно 394 мм.

В зоне, охватываемой обоими глазами, будет наблюдаться стереоскопическое изображение. В общей сложности отсутствие стереоскопического эффекта для периферийных зон поля не приводит к потере информативности, поскольку детализация видения изображения каждым глазом не теряется.

В рассмотренной ситуации следует отчётливо представлять различия между зрачковыми зонами HUD авиа- и автобазирования.

В первом случае зрачковая зона имеет вполне определённые границы, обуславливаемые величиной выходного зрачка, совпадающего с областью глаз пилота и зависящие от размеров апертурной диафрагмы в достаточно сложной по композиции проекционной системе HUD [10]. Перемещение глаз наблюдателя вдоль оси X за пределы зрачковой зоны будет вызывать постепенное виньетирование (затенение) периферийных зон поля зрения, а в дальнейшем и их экранирование (срезание).

Во втором варианте выходной зрачок отсутствует, поскольку сама оптическая система состоит из одного децентрированного оптического элемента — комбинера, обеспечивающего только проекцию генерируемого изображения в зону наблюдения. В этом случае срезание поля изображения может происходить и при нахождении глаза в зрачковой зоне и вне её в зависимости от её величины (рис. 2), и глаз наблюдателя будет видеть только часть поля.

В процессе движения транспортного средства водителю постоянно приходится подстраиваться к условиям комфортного наблюдения в пределах зрачкового пространства, ориентируясь на его центральную зону, но не теряя целостности наблюдаемого изображения.

В [1] достаточность размеров зрачковой зоны HUD автобазирования определялась величиной 75×40 мм². В рассмотренном выше примере предельные размеры этой зоны намного превосходят приведённые в источнике.

Очевидно, для комфортного наблюдения зрачковая зона может быть ограничена достаточной величиной 200 мм по диагонали при условии сохранения в её рамках среднестатистической предельной разрешающей способности глаза человека в пределах 1 угловой минуты [12]. В этом случае при значении размера зрачковой зоны в верти-

кальном направлении, равном, допустим, 75 мм по вертикали (размер по горизонтали в [1]) величина зрачковой зоны в горизонтальном направлении будет равна 185 мм, что ощутимо больше значений, приведённых в [1].

Сформулированные выше условия достаточны для проведения оптимизации системы однокомпонентного HUD, однако следует отметить, что перечень коррекционных параметров ограничен их малым количеством: фокусным расстоянием (радиусом) зеркальной поверхности, изменением расстояний s , s' , z , разворотом комбинера и плоскости изображения вокруг оси X , возможной асферизацией отражающей поверхности.

Необходимо подчеркнуть, что при выбранном условии оценки качества оптической системы расчёт её целесообразно вести в обратном ходе световых лучей (от мнимого изображения к зрачковой зоне), определяя расходимость лучей ε' в угловой мере (в минутах) по формуле

$$\varepsilon' = 3400 \frac{\delta' \beta}{s' + z}, \quad (4)$$

где δ' — диаметр светового пятна рассеяния в изображении точки в обратном ходе световых лучей на объекте (дисплее генератора изображений).

Величина полевого угла в пространстве изображений ($2\omega'$) при этом определится по формуле

$$2\omega' = 2 \arctg \frac{y'}{s' + z}. \quad (5)$$

На рис. 3 представлена рассматриваемая оптическая система с трассировкой хода оптических лучей, где 2 — мнимое изображение экрана дисплея 1 комбинером 4, наблюдаемое в пределах зрачковой зоны 3. Угол α — угол разворота комбинера вокруг вершины светоделительной поверхности.

После оптимизации обозначенные на рисунке параметры приняли значения $s = -514$ мм, $s' = 4469$ мм, $z = 476$ мм, $\alpha = 15^\circ$. Радиус комбинера и линейное увеличение при этом стали равными соответственно

$R = -1150$ мм и $\beta = 7,78^\circ$. Размер y' рассматриваемого мнимого изображения половины диаго-

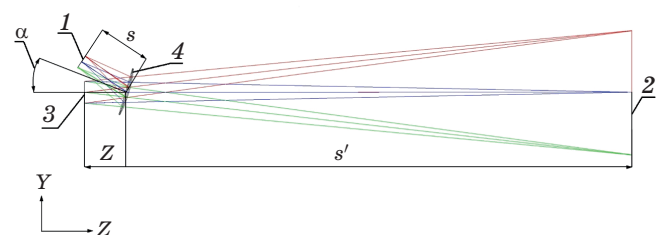


Рис. 3. Оптическая система однокомпонентного HUD с трассировкой хода оптических лучей.

нали дисплея при данном увеличении будет равен $y' = 494$ мм.

Исходя из приведённых величин, расстояние от центра дисплея до центра зрачковой зоны будет равно 257 мм, а сам дисплей будет находиться впереди головы водителя на расстоянии 31 мм, что не противоречит требованиям в [11].

Видимое увеличение системы Γ определяется как отношение тангенса угла γ' , под которым наблюдатель видит изображение объекта при рассмотривании его через оптический прибор к тангенсу угла γ , под которым объект может быть виден невооружённому глазу наблюдателя. В данном случае, при расстоянии от наблюдателя до дисплея с диагональю 5'', например, дисплея навигатора в кабине автомобиля, равном величине порядка 600 мм, видимое увеличение будет равно $\Gamma \approx 1^{\times}$. Эта величина Γ обеспечивает выполнение условия естественного впечатления [12] в отличие от системы в [7].

В табл. 2 и 3 представлен сравнительный анализ aberrаций системы в угловой мере с максимальными размерами выходных зрачков 200 мм (диаметр зрачковой зоны) и 4 мм до оптимизации и после. Величина выходного зрачка 4 мм соответ-

Таблица 2. Сравнительный анализ aberrаций системы с диаметром выходного зрачка 200 мм до оптимизации и после

Размер предмета, ориентированного по оси X (Y), мм	Аберрации системы в угловой мере до оптимизации, мин	Аберрации системы в угловой мере после оптимизации, мин
494	99 (101)	67 (85)
349	98 (100)	70 (84)
0	97 (96)	72 (72)
-349	98 (78)	70 (54)
-494	99 (66)	67 (37)

Таблица 3. Сравнительный анализ aberrаций системы с диаметром выходного зрачка глаза 4 мм до оптимизации и после

Размер предмета, ориентированного по оси X (Y), мм	Аберрации системы в угловой мере до оптимизации, мин	Аберрации системы в угловой мере после оптимизации, мин
494	0,88 (1,80)	0,72 (1,0)
349	0,87 (1,53)	0,65 (0,86)
0	0,86 (0,90)	0,56 (0,56)
-349	0,87 (0,96)	0,65 (0,43)
-494	0,88 (1,0)	0,72 (0,43)

ствует среднестатистическому значению диаметра зрачка человеческого глаза в условиях умеренного освещения. Этот размер зрачка принят для оценки качества изображения рассматриваемой оптической системы в процессе перемещения глаза наблюдателя в пределах зрачковой зоны.

Аберрации рассчитаны соответственно размерам объекта в пространстве предметов в обратном ходе световых лучей, последовательно ориентированного вдоль координатных осей X и Y. В скобках указаны величины при ориентировке предмета вдоль оси Y.

Из таблиц видно, что при ориентации предмета вдоль оси Y значения aberrаций в его пределах несимметричны относительно нулевой величины предмета. Это обстоятельство подтверждает вывод в [1] о возникновении в децентрированных системах, к которым относится и рассматриваемая в настоящей статье, наклонного астигматизма, вызванного наклоном изображения вследствие разворота комбинера.

Следует добавить, что величина этой aberrации растёт с увеличением угла наклона комбинера, причём, как показывают расчёты, значения угловых aberrаций системы с максимальным углом α для центральных и периферийных зон зрачкового пространства для различных точек поля многократно превышают aberrации соответствующих зон при $\alpha = 0$. Это обстоятельство в условиях ограниченности количества коррекционных параметров, влияющих на величину наклонного астигматизма, вызывает неизбежность ограничения угла разворота комбинера. При необходимости наклонный астигматизм может быть в определённой степени компенсирован разворотом матрицы, генерирующей изображение.

Поскольку рассматриваемое мнимое изображение имеет согласно размерам генерирующей свет матрицы прямоугольную форму, то составляющие aberrации в направлении X и Y будут меньше aberrаций точек поля в диагональном направлении.

Как видно из табл. 3, aberrации после оптимизации системы не превышают предельную разрешающую способность глаза. Дисторсия системы вследствие относительной малости угла γ' ($\gamma' = 11,5^\circ$) не превышает 2,6%, что является вполне приемлемым.

Следует сразу отметить, что оптимизация системы проводится в пределах всей зрачковой зоны, поскольку именно так гарантирует оптимальное качество изображения, в том числе и минимизацию параллактических искажений.

Данные aberrации рассчитаны при размещении центра зрачка на оптической оси.

Определение максимальной дисторсии проводилось при положении зрачка глаза в центральной и периферических точках по всей зрачковой зоне.

Реально, как отмечалось выше, положение глаз наблюдателя в пределах зрачковой зоны в процессе движения носителя меняется из-за тряски и вибраций. Проведение расчётов аберраций системы при различных положениях зрачка диаметром 4 мм показало, что при позициях в периферийных частях зрачковой зоны с координатами в направлениях X в пределах ± 100 мм и Y — в пределах ± 40 мм аберрации системы увеличиваются, но не превышают величины 1,8 угловых минут. Поскольку человек автоматически отслеживает процесс наблюдения и выбирает пространство комфортного видения, следует полагать, что в зонах незначительного искажения качества изображения он будет находиться короткое время.

Особый интерес вызывает вопрос об асферизации светоделительной поверхности в системах рассматриваемого типа и об её возможностях и необходимости применения.

Изначально напрашивается предположение о возможности частичной компенсации наклонного астигматизма в системе за счёт составляющих второго и высших порядков в форме светоделительной поверхности комбинера.

Однако, как видно из табл. 4, приведённые в ней аберрации, найденные в соответствии с расчётами оптической системы комбинера с асферической светоделительной поверхностью высокого порядка (до 14-го включительно), ненамного отличаются от значений в табл. 2. В скобках указаны величины при ориентировке предмета вдоль оси Y . Из содержания таблицы видно, что в оптической системе присутствует наклонный астигматизм, неустранимый, как и предполагалось, асферизацией светоделительной поверхности комбинера. Минимизация наклонного астигматизма в системах отображения вторичной информации происходит за счёт усложнения композиции схемы, как описано в [1, 10].

Следовательно, в данной системе добавление асферики 2-го порядка и выше нецелесообразно, так как это не приносит желаемых результатов и делает использование такой поверхности нерациональным как с технической, так и с экономической точек зрения.

Таблица 4. Аберрации системы с асферической светоделительной поверхностью высокого порядка при размерах выходного зрачка 200 мм

Размер предмета, ориентированного по оси X (Y), мм	Аберрации системы в угловой мере, мин
494	73 (93)
349	76 (91)
0	79 (79)
-349	76 (62)
-494	73 (46)

Нужно отметить, что оптические системы HUD относятся к бинокулярным композициям, когда наблюдение происходит двумя глазами одновременно через один оптический тракт. Как правило, в таких системах в пределах бинокулярного поля обзора возникают искажения, вызванные бинокулярным параллаксом, когда два глаза наблюдателя одновременно видят одно и то же изображение.

При рассмотрении этого явления следует различать следующие понятия:

– Мгновенное поле зрения (IFOV — Instantaneous field of view) — наименьший по размеру объект, который глаз, видит или различает в любой заданный момент времени.

– Общее поле зрения (TFOV — Total field of view) — предельный размер наблюдаемого объекта через систему.

– Бинокулярное поле зрения (BFOV — Binocular field of view) — размер предмета, видимый двумя глазами в горизонтальном положении. Определяет максимальную угловую величину изображения HUD, которая может быть видна обоими глазами одновременно [5].

Бинокулярный параллакс — построение объёмного зрительного образа на основе различий проекций трёхмерного пространства на сетчатку левого и правого глаза [12].

Поэтому, бинокулярный параллакс существует только в пределах бинокулярного поля обзора. Если оптическая система несовершенна в аберрационном плане, будут появляться некоторые угловые расхождения между тем, что видят левый и правый глаз. Эти расхождения называются бинокулярными ошибками, обусловленными параллаксом. Ошибки параллакса определяются для среднестатистического расстояния между глазами в 64 мм, что является расстоянием между зрачками.

Ошибки параллакса подразделяются на горизонтальные и вертикальные [13]. Горизонтальные ошибки возникают, как правило, в плоскости глаз. Вертикальные ошибки возникают в плоскости, перпендикулярной плоскости глаз. Ошибки, вызванные бинокулярным параллаксом, для фиксированной точки поля обзора эквивалентны угловой разнице между двумя лучами, входящими в глаза и разделёнными расстоянием между зрачками.

Для идеального проецируемого виртуального изображения, угловые направления лучей одинаковы, и ошибка, вызванная параллаксом, будет равна нулю. Т.к. оптические системы HUD не совершенны, в них присутствуют остаточные некомпенсированные аберрационные погрешности [11].

Горизонтальный параллакс в дальнейшем делится на конвергентные ошибки, приводящие к тому, что приходится сводить глаза вовнутрь, и дивергентные ошибки, приводящие к повороту глаз в разные стороны.

Вертикальные параллактические ошибки, или дипвергенция, приводят к тому, что глаза будут отклоняться по-разному относительно горизонтальной плоскости глаз.

Конвергенция, дивергенция и дипвергенция описывают, как два глаза ощущают изображение для того, чтобы символы воспринимались едиными, не расходящимися.

Как правило, глаза человека не могут с лёгкостью компенсировать параллактические дивергенцию или дипвергенцию. Потому следует эти ошибки максимально минимизировать.

Конвергенция ведёт к тому, что кажущаяся глубина изображения изменится внутри поля обзора. Глаза человека способны компенсировать ошибки конвергенции, однако это влечёт за собой уменьшение точности восприятия изображения.

Вычисленные ошибки бинокулярного параллакса в HUD должны соответствовать следующим значениям:

В пределах центральной части поля обзора диаметром в пределах угла в 10° при наблюдении из опорной точки наблюдения конвергенция $< 6'53''$ (2,0 мрад), дивергенция $< 3'26''$ (1,0 мрад), дипвергенция $< 3'26''$ (1,0 мрад).

В пределах всего поля обзора и при наблюдении в пределах зоны видимости HUD конвергенция $< 12'2''$ (3,5 мрад), дивергенция $< 5'9''$ (1,5 мрад), дипвергенция $< 6'53''$ (2,0 мрад).

Следует сказать, что большие ошибки параллакса могут оказаться неприемлемыми при наличии значительных искривлений ветрового стекла.

В [14] приведены иные цифры, определяющие допустимую норму на сходимость и расхожимость световых пучков по широкому зрачку прибора:

- на конвергенцию — $34'$ сходимости,
- на дивергенцию — $17'$ расхожимости глаз наблюдателя.

Превышение этих норм полностью нарушают комфортность наблюдения.

Как правило, величина параллактических искажений в оптическом приборе коллиматорного типа связана с достигнутым в нём уровнем качества изображения, определяющегося пятном размытия на сетчатке глаза наблюдателя и сопоставимого с качеством таких наблюдательных приборов, как бинокли, в том числе со стабилизацией изображения (перископы, дальномеры и др.). Допустимые диаметры кружков рассеяния в этих приборах порядка $5'$ для центра поля и менее $20'$ — для края поля изображения в пространстве наблюдения.

Определение по формуле (4) разности значений сферической аберрации $\Delta\delta'$ в угловой мере (ϵ') в обратном ходе световых лучей для координат выходного зрачка в горизонтальном направлении 100 мм и 36 мм для $\lambda = 546$ нм при $s' = 4469$ мм, $z = 476$ мм, $\beta = 7,78^\circ$, (см. расчёт выше) показало $\epsilon' = 6'$, где $\Delta\delta' = 9,1$ мм.

Это конвергенция при глазной базе наблюдателя, равной 64 мм.

С другой стороны, проведение аналогичного расчёта для внеосевого пучка лучей в горизонтальном направлении при максимальном размере половины величины объекта, равной 431 мм, $\epsilon' = 4,34'$ при $\Delta\delta' = 6,5$ мм. За величину объекта принято значение изображения половины горизонтальной стороны дисплея в прямом ходе световых лучей. Величина ϵ' здесь характеризует дивергенцию.

Величина дипвергенции при ориентировке объекта размером 242 мм (изображение половины вертикальной стороны дисплея в прямом ходе световых лучей) перпендикулярно горизонтальной плоскости в угловой мере не превышает в пределах зоны видимости $7'$, что в совокупности с приведёнными выше значениями углов укладывается в допуски в [11].

Из сказанного следует, что при величинах искажений параллакса для других точек поля и зрачка, не превышающих приведённых выше допустимых значений, рассмотренную систему можно считать комфортной при наблюдении.

В реальных условиях измерение параллактических искажений производится путём разбиения поля обзора на сетку, включающую целый массив точек обзора. Далее выполняются измерения в пределах зрачковой зоны соответственно установленной базе глаз наблюдателя значений параллактических ошибок для каждой точки сетки.

Очевидно, что такой измерительный процесс должен быть автоматизирован с использованием возможностей цифровой техники.

Таким образом, в данной работе были впервые рассмотрены оптимальные характеристики HUD с однокомпонентным оптическим элементом в виде децентрированной менисковой линзы, первая светоделительная поверхность которой обращена вогнутостью к наблюдателю и излучающему дисплею.

В соответствии с принятыми габаритно-эргономическими и технологическими исходными данными в статье рассмотрен алгоритм разработки системы HUD автобазирования с оптимальными ТТХ согласно условиям Квалификационных требований [11] к системам дополненной реальности.

Достигнутые в разработке выходные параметры системы, приведённые ниже, обеспечивают комфортное качество изображения (абберации в таблицах):

- линейное поле в пространстве изображения при размере дисплея генератора изображений (смартфона) 5 дюймов (127 мм по диагонали), $110,7 \times 62,3$ мм² при соотношении сторон 16:9 в соответствии с линейным увеличением $\beta = 7,78^\times$ равно 988 мм;

- видимое увеличение $\Gamma \approx 1^\times$ при расстоянии зрачковой зоны от комбинера $z = 476$ мм;

– размер зрачковой зоны при условии сохранения предельной разрешающей способности глаза человека $1' — 185 \times 75 \text{ мм}^2$ (200 мм по диагонали);

– размер комбинера $190 \times 80 \text{ мм}^2$ (206 мм по диагонали);

– угол поля зрения с оптической осью $\gamma' = 11,5^\circ$.

При смещении глаз наблюдателя влево или вправо общий угол зрения увеличится на $\Delta\gamma' = 1,74^\circ$.

Следует сказать, что данный алгоритм справедлив при разработке HUD авиабазирования с той только разницей, что, как уже упоминалось, рассматриваемое изображение находится на бесконеч-

ности. В этом случае выходной дисплей генератора изображения будет располагаться от комбинера на расстоянии, близком к его фокусному расстоянию. Пересчёт системы не вызовет затруднений и значительных её изменений, поскольку перерасчёт фокусного расстояния незначителен (0,2 диоптрии).

На фоне широко ведущихся за рубежом разработок и производства систем аналогичного назначения различной сложности проведённое исследование, несомненно, будет интересно как в академическом аспекте, так и полезно для желающих заняться их созданием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багдасаров А.А., Анитропов Р.В., Багдасарова О.В., Лившиц И.Л. Индикаторные системы отображения вторичной информации комплексов авионики и автобазирования // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2011. № 2. С. 48–52.
2. Архипова Л.Н., Багдасаров А.А., Багдасарова О.В., Шевченко Д.Н. Панорамные системы кругового обзора // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 6. С. 20–31.
3. Никифоров О.В., Пименов Ю.Д., Сокольский М.Н., Строганов А.А., Эфрос А.И. Оптическая система широкоугольного коллиматорного авиационного индикатора // Оптический журнал. 2009. Т. 26. № 10. С. 37–41.
4. Кучерявый А.А. Индикация на лобовом стекле // Бортовые информационные системы. Курс лекций / Под ред. Мишина В.А. и Ключева Г.И. Ульяновск: УЛГТУ, 2004. 504 с.
5. Fisher R.L. Aircraft head up displays from refractors to holograms in lens design // Critical reviews of optical science and technology / Ed. by Smith W.J. Bellingham: SPIE WA, 2003. V. CR41. P. 173–191.
6. Wood R.B., Howells P.J. Head-up displays. 2000. [Электронный ресурс]: <davi.ws>avionics/TheAvionicsHandbook_Cap_4.pdf>.
7. The BMW Official Website – Award Winning Luxury New Cars. 2017. [Электронный ресурс]: <www.bmw.co.uk>.
8. Ган М.А., Ларионов С.А., Старков А.А. Дисплейные системы на основе Free-Form поверхностей // Сборник трудов конференции «Прикладная оптика – 2010». С. 222–226.
9. SPX-HUD01. SPX-HUD01. Проекционный дисплей Navgate HUD для автомобильной навигации на лобовом стекле с помощью смартфона. 2017. [Электронный ресурс]: <www.pioneer-rus.ru/products/spx-hud01>.
10. Третьяков Д.А., Харбергер Л.Ю., Багдасаров А.А., Роженцев В.В. Коллиматорная индикаторная система // Патент РФ № 2364902. 2008.
11. КТ-8055 Квалификационные требования. Требования к индикаторам на лобовом стекле. 2012. [Электронный ресурс]: <twirpx.com>.
12. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. М.; Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
13. Бардин А.Н. Сборка и юстировка оптических приборов. М.: Высшая школа, 1968. 328 с.
14. Волков В.В., Луизов А.В. Эргономика зрительной деятельности человека. Л.; М.: Машиностроение, 1989. 112 с.