

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УСЛОВИЯ УСТРАНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПАРАЛЛАКСА В СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СО СХОДЯЩИМИСЯ ОПТИЧЕСКИМИ ОСЯМИ

© 2012 г. К. А. Гребенюк\*, канд. физ.-мат. наук; В.В. Петров\*\*, доктор физ.-мат. наук

\* Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов

\*\* Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

E-mail: KonstantinAG@yandex.ru

Проведена экспериментальная проверка полученного ранее условия оптической компенсации углового вертикального параллакса при воспроизведении стереопар от камер со сходящимися осями.

*Ключевые слова:* стереоскопия, вертикальный параллакс.

Коды OCIS: 080.2740, 110.6880, 330.1400

Поступила в редакцию 29.12.2010

### Введение

В стереоскопических видеосистемах изображения левого и правого ракурсов объекта получают с помощью двух камер, ориентированных по схеме с параллельными или сходящимися (конвергентными) оптическими осями. Непараллельность сенсоров камер в схеме со сходящимися осями приводит к появлению в получаемой стереопаре вертикального параллакса, который при наблюдении препятствует слитному восприятию стереопары [1, 2].

Для решения этой проблемы авторами настоящей статьи было предложено воспроизводить левое и правое перспективные изображения объекта не в общей плоскости, а в пересекающихся плоскостях наблюдения, что соответствовало бы геометрии конвергентной съемки и приводило к оптической компенсации вертикального параллакса [3]. В этой работе показано, что устранение вертикального параллакса должно произойти, если половинный угол  $\alpha$  пересечения плоскостей наблюдения левого и правого перспективных изображений будет удовлетворять условию

$$\sin \alpha = \frac{V}{Mf} \operatorname{tg} \beta, \quad (1)$$

где  $\beta$  – угол конвергенции оптических осей объективов камер,  $f$  – фокусное расстояние объективов камер,  $M$  – увеличение кадра при

воспроизведении изображений на экранах,  $V$  – дистанция наблюдения стереопары зрителем.

Целью данной работы стала экспериментальная проверка условия (1). Для этого был получен набор стереопар тестового объекта, для каждой стереопары найдены расчетное и экспериментальное значения угла  $\alpha$ , требуемого для устранения вертикального параллакса, проведено сравнение результатов расчета и эксперимента.

### Получение расчетных значений

Для нахождения расчетных значений угла  $\alpha$ , требуемых для устранения вертикального параллакса, была получена новая форма записи условия (1), позволяющая определять данные значения по координатам пары сопряженных точек на левом и правом снимках.

На рис. 1 представлена предложенная в работе [3] схема воспроизведения с пересекающимися плоскостями наблюдения левого и правого перспективных изображений. В этой схеме левое  $A_L$  и правое  $A_R$  перспективные изображения предметной точки  $A$  воспроизводят на отдельных экранах, которые наблюдаются зрителем в плоскостях  $s_L$  и  $s_R$ , пересекающихся под углом  $2\alpha$ . Стереоскопическое изображение  $A'$  предметной точки  $A$  будет наблюдаться на пересечении визирных линий  $E_L A_L$  и  $E_R A_R$ , которые определяются как пря-

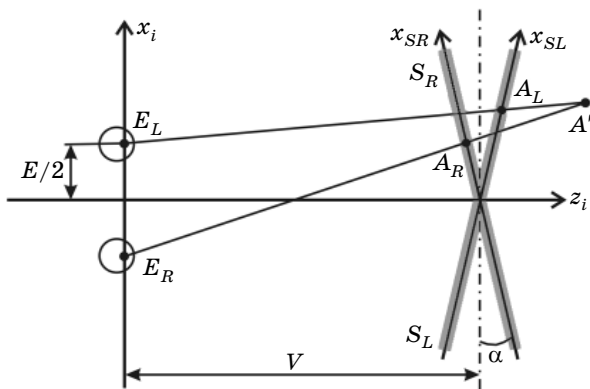


Рис. 1. Схема воспроизведения с пересекающимися плоскостями наблюдения левого и правого перспективных изображений (вид сверху).

мые, проходящие через центры  $E_L$  и  $E_R$  зрачков глаз зрителя, и соответствующие перспективные изображения точки  $A$ .

При наличии линейного вертикального параллакса между положениями точек  $A_L$  и  $A_R$  на левом и правом снимках визирные линии  $E_L A_L$  и  $E_R A_R$  становятся некомпланарными и расходятся по вертикали (вдоль оси  $y_i$ ) на некоторый угол, который назовем угловым вертикальным параллаксом. Условием устранения углового вертикального параллакса будет условие компланарности прямых  $E_L A_L$  и  $E_R A_R$ , которое в системе координат  $x_i y_i z_i$  пространства изображений запишется в виде

$$\begin{vmatrix} -E & 0 & 0 \\ X_L - \frac{E}{2} & Y_L & Z_L \\ X_R + \frac{E}{2} & Y_R & Z_R \end{vmatrix} = 0, \quad (2)$$

где  $X_L, Y_L, Z_L$  и  $X_R, Y_R, Z_R$  – координаты точек  $A_L$  и  $A_R$  в пространстве изображений,  $E$  – глазной базис зрителя.

Координаты  $X_L, Y_L, Z_L$  и  $X_R, Y_R, Z_R$  точек  $A_L$  и  $A_R$  в пространстве изображений связаны с координатами  $X_{SL}, Y_{SL}$  и  $X_{SR}, Y_{SR}$  этих же точек в системах координат  $x_{SL} y_{SL}$  и  $x_{SR} y_{SR}$  левого и правого снимков преобразованиями

$$\begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_{SL} \\ Y_{SL} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_{SR} \\ Y_{SR} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V \end{pmatrix}.$$

Подставив данные выражения в уравнение (2), получаем условие устранения вертикального параллакса в виде уравнения относительно угла пересечения плоскостей наблюдения. Решая полученное уравнение, находим

$$\sin\alpha = V \frac{Y_{SL} - Y_{SR}}{Y_{SL} X_{SR} + Y_{SR} X_{SL}}. \quad (3)$$

Соотношение (3) является новой формой записи условия устранения вертикального параллакса (1), которая позволяет находить угол  $\alpha$ , в практически важном случае, когда имеется стереопара, которую надо воспроизвести, но неизвестны параметры съемки, при которых она была получена.

Для получения тестовых стереопар вместо двух камер со сходящимися осями использовалась одна камера и эквивалентное вращение тестового объекта, которым являлась плоская прямоугольная решетка.

С помощью демоверсии программы StereoComparator 4.0 компании “StereoPixel” в каждой стереопаре измерялись координаты четырех пар сопряженных точек, соответствующих изображениям углов решетки. По формуле (3) для каждой пары сопряженных точек рассчитывалось значение угла  $\alpha$ , требуемое для устранения вертикального параллакса. В качестве окончательного значения угла для каждой стереопары принималось среднее арифметическое значений, полученных для четырех углов решетки.

## Получение экспериментальных значений

Для экспериментального определения значений угла  $\alpha$ , при которых устраняется вертикальный параллакс, использовался стереоскопический дисплей с воспроизведением перспективных изображений в пересекающихся плоскостях, описанный в работе [4]. Особое внимание уделялось выбору отклика, по которому можно было бы судить о величине воспринимаемого зрителями вертикального параллакса.

В работе [5] при определении порогового значения вертикального параллакса в качестве отклика использовалась субъективная оценка зрителем комфортности наблюдения стереоизображения: “спокойно смотрится кадр или что-то затрудняет восприятие”. Однако данный

отклик представляется недостаточно удобным для измерения и недостаточно устойчивым к воздействию посторонних факторов, которые могут вызвать зрительный дискомфорт.

Поскольку наличие вертикального параллакса затрудняет слитное восприятие стереопары, в качестве отклика в настоящей работе была выбрана степень двоения наблюдаемого изображения, которая оценивалась зрителями по шкале Лайкерта. В качестве переменных факторов были выбраны угол конвергенции камер при съемке  $\beta$  и угол пересечения плоскостей наблюдения левого и правого изображений при воспроизведении  $\alpha$ .

Проведенные измерения степени двоения достаточно подробно представлены в работе [4] при демонстрации возможностей построенного стереоскопического дисплея, поэтому приведем здесь лишь конечный результат этих измерений. На рис. 2 изображены экспериментальные графики зависимости усредненной степени двоения изображения от угла  $\alpha$ , полученные для пяти тестовых стереопар. Каждое значение степени двоения на рис. 2 является результатом усреднения по 21 измерению (7 зрителей  $\times$  3 измерения при каждой паре значений углов  $\beta$  и  $\alpha$ ). На графиках степень двоения, равная нулю, соответствует полному отсутствию двоения, когда от всех наблюдателей во всех измерениях был получен ответ “точно не двоится”. Степень двоения, равная единице, соответствует наиболее сильному двоению, когда во всех измерениях был получен ответ “точно двоится”.

Полученные зависимости имеют четко выраженные минимумы, в которых двоение полностью устранено. Значения угла  $\alpha$ , при которых достигаются эти минимумы, приняты авторами в качестве экспериментальных значений, при которых происходит устранение вертикального параллакса.

### Сравнение результатов расчета и эксперимента

Как видно из рис. 2, при увеличении угла конвергенции камер  $\beta$  минимумы степени двоения сдвигаются в сторону больших значений угла  $\alpha$ , что согласуется с условием (1).

В таблице приведены результаты сравнения расчетных и экспериментально полученных значений угла  $\alpha$ .

Для стереопары № 5 не указано экспериментальное значение  $\alpha$ , при котором устранял-

ся вертикальный параллакс, так как в исследованном диапазоне значений  $\alpha$  от 0 до 30° полного устранения двоения достигнуто не было. Это соответствует результату расчета, который показывает, что в данном случае угол  $\alpha$  превышает 30°.

Для стереопар № 1, 3 и 4 расчетные значения угла  $\alpha$  совпали с экспериментальными с точностью до 0,5°, а для стереопары № 2 – до 2°. Полученные расхождения не превышают нижней оценки погрешности измерения угла  $\alpha$  в проведенных экспериментах, которая равна шагу, с которым менялся угол при измерениях, и составляет 2°.

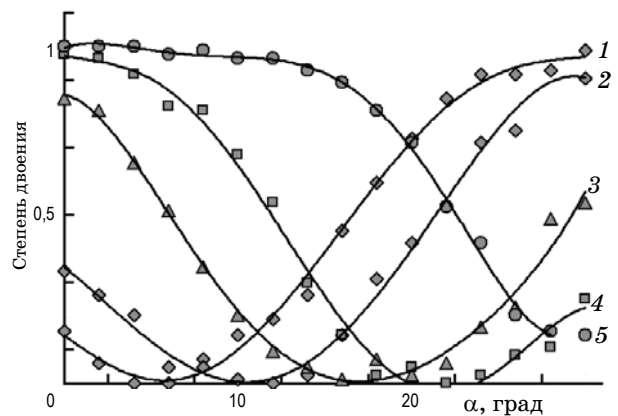


Рис. 2. Экспериментальные зависимости степени двоения стереоизображения от угла  $\alpha$  пересечения плоскостей наблюдения левого и правого перспективных изображений, полученные при разных углах конвергенции камер  $\beta$ , равных 2,5° (1), 5° (2), 7,5° (3), 10° (4), 15° (5).

Расчетные и экспериментальные значения угла пересечения плоскостей наблюдения левого и правого изображений  $\alpha$ , требуемые для устранения вертикального параллакса, полученные для различных стереопар (для различных значений угла конвергенции  $\beta$ )

Номер стереопары	$\beta$ , град	$\alpha_{\text{расч}}$ , град	Наименьшая степень двоения	$\alpha_{\text{эксп}}$ , град	$ \alpha_{\text{расч}} - \alpha_{\text{эксп}} $ , град
1	2,5	5,5	0	6	0,5
2	5	10	0	12	2
3	7,5	16,5	0,01	16	0,5
4	10	21,7	0	22	0,3
5	15	33,3	0,14	—	—

## Заключение

Проведенная проверка подтверждает справедливость условия (1) устранения вертикального параллакса. Значения угла пересечения плоскостей наблюдения, при которых происходит устранение вертикального параллакса в проведенных экспериментах, совпадают с расчетными значениями, полученными по формуле (3), эквивалентной условию (1).

Наблюдаемое совпадение результатов расчета и эксперимента не только подтверждает справедливость условия (1), но и косвенно свидетельствует о правильности геометрической модели формирования стереоскопического изображения, принятой в стереоскопии и использованной в работе [3].

Полученные результаты показывают, что условие (1) и его новую форму (3) можно успешно использовать для устранения вертикального параллакса в стереоскопических системах со сходящимися оптическими осями.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Валюс Н.А.* Стереоскопия. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 379 с.
2. *Woods A., Docherty T., Koch R.* Image Distortions in Stereoscopic Video Systems // Proc. SPIE. 1993. V. 1915. P. 36–48.
3. *Гребенюк К.А., Петров В.В.* Устранение геометрических искажений в стереоскопических системах со сходящимися оптическими осями // Опт. и спектр. 2008. Т. 104. № 4. С. 698–703.
4. *Гребенюк К.А., Петров В.В.* Стереоскопический дисплей с воспроизведением перспективных изображений в пересекающихся плоскостях // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 9. С. 49–51.
5. *Шацкая А.Н.* К вопросу о допустимых пределах вертикальных параллаксов при просмотре стереокинофильмов // Техника кино и телевидения. 1961. Т. 10. С. 57–65.