

УДК 681.2.778.4

Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии

Зайцева Е.Г.¹, Кислюк А.А.¹, Ларионова Т.О.², Дубина Н.Н.¹

¹Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

²Приборостроительный завод «Оптрон»,
ул. Ф. Скорины, 52, г. Минск 220141, Беларусь

Поступила 27.09.2018

Принята к печати 30.10.2018

Анализ известных методов записи и воспроизведения объемного изображения позволяет выделить два различных подхода. Первый заключается в формировании стереоскопических изображений, второй обеспечивает создание оптической модели объекта и включает как разновидность группу методов интегральной фотографии.

Использование методов интегральной фотографии для записи и воспроизведения объемных изображений является актуальным вследствие отсутствия недостатков, присущих стереоскопическим методам, и относительной простоты технической реализации. Наличие линзового растра в данном методе является возможным источником появления искажений изображения. Целью настоящей работы являлось установление диапазона параметров линзовой системы для интегральной фотографии, а именно, допустимых значений шага линзового растра при условии отсутствия искажений, вызванных наличием этого растра.

Приведены виды возможных искажений и указаны источники их возникновения. Сформулированы требования к шагу линзового растра, исходя из условий отсутствия ложной информации, отсутствия прерывности изображения по глубине и в поперечном направлении, а также незаметности линзовых элементов матрицы воспроизведения.

Исследования показали, что шаг линзового растра лимитируется четырьмя неравенствами, причем первые три из них ограничивают значение шага снизу, а четвертое – сверху. Произведен анализ совокупности условий, ограничивающих шаг линзовой матрицы. Границы допустимых значений шага зависят от четырех групп параметров, связанных с другими размерами растра, расположением объектов съемки, параметрами воспроизведения и наблюдения. Приведен результат использования методики в виде зависимости допустимого диапазона шага линзового растра от поперечной координаты записываемой точки при фиксированных значениях других параметров.

Ключевые слова: интегральная фотография, линзовый растр, искажения.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

Адрес для переписки:

Зайцева Е.Г.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: egzaytseva@bntu.by

Address for correspondence:

Zaytseva E.G.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: egzaytseva@bntu.by

Для цитирования:

Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н.
Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 4. – С. 337–346.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

For citation:

Zaytseva E.G., Kisliuk A.A., Laryonova T.O., Dubina N.N.
[Lens FASTER as a Source of Distortions in Integral Photography].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 4, pp. 337–346 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

Lens Raster as a Source of Distortions in Integral Photography

Zaytseva E.G.¹, Kisliuk A.A.¹, Laryonova T.O.², Dubina N.N.¹

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

²JSC Instrument-making plant «Optron»,
Skaryna F. str., 52, Minsk 220141, Belarus

Received 27.09.2018

Accepted for publication 30.10.2018

Abstract

Analysis of methods for recording and reproducing a three-dimensional image allows to distinguish two different approaches. The first approach consists in formation of stereoscopic images, the second one provides the formation of an optical object model and includes particularly a group of integral photography methods.

The use of integral photography methods for recording and reproducing volumetric images is relevant due to the lack of flaws inherent for stereoscopic methods and relative simplicity of technical implementation. Lens raster used in this method is a possible source of image distortion. This paper aim is to determine the range of parameters of the lens system, namely, the allowable values of the pitch of the lens raster, providing distortions absence caused this raster.

Types of possible distortions and sources of their occurrence are indicated. The requirements for the pitch of the lenticular raster are formulated, based on conditions of false information absence, absence of discontinuity of the image in depth and in the transverse direction, and invisibility of lens elements of the reproduction matrix.

Studies shoed that the lenticular pitch is limited by the four inequalities, three of which limit the pitch value from below, and the fourth one from above. A set of conditions limiting the step of the lens matrix was analyzed. The boundaries of allowable step values depend on four groups of parameters: raster dimensions, location of the subjects, reproduction and observation parameters. Result of the method usage as a dependence of the allowable range of the pitch of the lenticular raster on transverse coordinate of the recorded point with fixed values of other parameters is presented.

Keywords: integral photography, lens raster, distortions.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

Адрес для переписки:

Зайцева Е.Г.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: egzaytseva@bntu.by

Address for correspondence:

Zaytseva E.G.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: egzaytseva@bntu.by

Для цитирования:

Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н.
Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 4. – С. 337–346.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

For citation:

Zaytseva E.G., Kisliuk A.A., Laryonova T.O., Dubina N.N.
[Lens Raster as a Source of Distortions in Integral Photography].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 4, pp. 337–346 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

Введение

Анализ [1, 2] известных методов записи и воспроизведения объемного изображения позволяет выделить два различных подхода. Первый подход заключается в записи или синтезе одной или множества пар изображений, причем каждое из пары при воспроизведении предназначено для наблюдения одним глазом и является незаметным для другого глаза. Группа соответствующих методов объединяет обычную стереоскопию (использование одной пары изображений) и параллакс-панорамные методики (использование множества стереопар) [3, 4]. Общей проблемой для стереоскопических методов является расхождение расстояний аккомодации и конвергенции. В системах, использующих второй подход, такая проблема отсутствует. Здесь при воспроизведении необходимо создать в трехмерном пространстве элементы, являющиеся источником излучения и образующие оптическую модель объекта.

Известно несколько методов получения оптических моделей. Наибольшее распространение в настоящее время получили два: голография и интегральная фотография. Если применение голографических методов требует наличия достаточно сложного оборудования, большой скорости обработки информации, то интегральные методы предусматривают наличие традиционных оптических элементов (линз, зеркал), не требуют большого объема расчетных операций, кроме того, на основе полученной информации возможно синтезировать голограммы [5].

Запись методом интегральной фотографии предусматривает преобразование трехмерного объекта в совокупность двумерных плоских изображений, полученных из разных точек зрения (ракурсов). Это возможно осуществить, применяя линзовый растр [6]. Очевидно, что записывать таким образом информацию возможно не только в видимом диапазоне, но и в инфракрасном [7], ультрафиолетовом, а воспроизводить – в видимом. Соответственно, возможен и обратный вариант – на основании записанных в видимом диапазоне изображений формировать объемные инфракрасные [8] и ультрафиолетовые поля, а также их комбинации с видимыми объемными изображениями. Источником информации для воспроизведения могут быть и изображения, синтезированные компьютерным способом.

Особенностью многолинзовых 3D-систем по сравнению с традиционными 2D-системами

является наличие дополнительного дискретизатора (линзовый растр), который может вносить в изображение дополнительные искажения. Методики расчета параметров стереоскопических систем, в том числе и с линзовыми растрами, приводятся в большом количестве источников, например [1, 6, 9]. Для систем интегральной фотографии с линзовым растром известны расчеты зон наблюдения, разрешающей способности, функции передачи модуляции элементов, геометрические расчеты, связанные с масштабом и параллаксом [1, 2, 6]. Очевидно, что, кроме вышеперечисленных параметров, для оптимизации многолинзовой системы интегральной фотографии в расчет необходимо внести ограничения, связанные с искажениями из-за наличия линзового растра. Известна методика расчета и критерии оценки растровых искажений применительно к полиграфическим изображениям [10], но последние имеют, в отличие от видео- и фотоизображений, всего 2 уровня яркости.

На основании вышеизложенного целью настоящей работы являлось установление диапазона параметров линзовой системы для интегральной фотографии, а именно, допустимых значений шага линзового растра при условии отсутствия искажений, вызванных наличием этого растра. Искажения при некорректно выбранном шаге линзового растра могут проявляться как:

- ложная информация;
- прерывистость изображения по глубине;
- прерывистость изображения в поперечном направлении;
- заметность линзовой структуры растра.

Для достижения цели исследования необходимо, во-первых, установить причину возникновения каждого вида искажений, во-вторых для каждого источника искажений получить математические зависимости, устанавливающие связь ограничений шага растра с другими параметрами, в-третьих, сопоставив полученные зависимости и рассматривая их как систему неравенств, определить диапазон допустимых значений шага линзового растра.

Допустимые значения шага линзового растра при отсутствии ложной информации

Ложная информация в воспроизводимом методом интегральной фотографии изображении может появиться по следующим причинам. Во-первых, это неправильное сочетание шагов

линзового растра и цифровой матрицы как при видеосъемке, так и при воспроизведении, приводящее к возникновению муар-эффекта. В соответствии с теоремой отсчетов шаг линзовой матрицы должен не менее чем в 2 раза превышать шаг цифровой. Если для процесса видеосъемки такая ситуация практически не возможна, так как шаг линзовой матрицы намного больше шага цифровой, то при воспроизведении эти шаги могут быть соизмеримы из-за крупного размера пикселей цифровых матриц. Данное условие не анализируется в настоящем исследовании, так как принято, что соотношение шагов линзовой и цифровой матриц при воспроизведении соответствует теореме отсчетов.

Во-вторых, возможным источником ложной информации при воспроизведении является отсутствие ограничения поля зрения элементов линзового растра при видеосъемке. При этом возможна ситуация, когда изображение точки объекта, построенное на цифровой матрице одной линзой, попадет на участок матрицы, предназначенный для изображений, которые строятся другой линзой. При воспроизведении это изображение воспроизведется линзой, не соответствующей записываемой, как ложная информация. Предотвратить появление ложной информации такого происхождения возможно, ограничив определенным образом шаг линзовой матрицы при видеосъемке.

На рисунке 1 представлена схема построения изображения произвольной точки A объекта i -м элементом видеосъемочной линзовой матрицы (i – номер линзы, начиная от начала координат, находящегося в точке пересечения горизонтальной и вертикальной осей матрицы). Ось X направлена параллельно плоскости матрицы-преобразователя, ось Z перпендикулярна этой плоскости, а точка A имеет соответственно координаты X_A и Z_A . Из рисунка 1 видно, что изображение точки A_i -й линзой удалено по оси X на Δ_i относительно оси симметрии линзы. Если поле зрения линзовых элементов конструктивно не ограничено, то для предотвращения появления искажений необходимо, чтобы расстояние Δ_i не превышало половину шага линзового растра t_{vc} , равного поперечному размеру линзы, т.е.:

$$\Delta_i \leq \frac{t_{vc}}{2}. \quad (1)$$

Если указанное условие не будет соблюдаться, записанное i -й линзой изображение точки A

будет воспроизводиться другой линзой, и восстановленное изображение будет отличаться от записываемого, т.е. возникнут искажения.

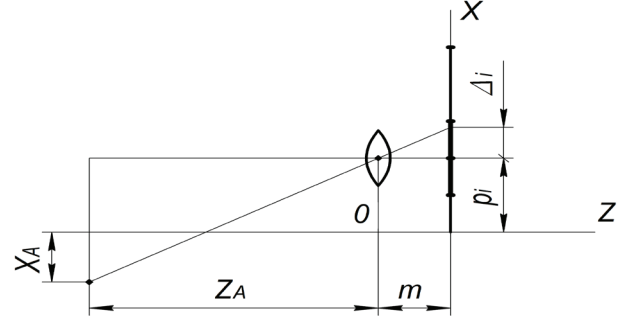


Рисунок 1 – Схема построения изображения произвольной точки объекта линзовым элементом матрицы при записи изображения

Figure 1 – Diagram of image formation of an arbitrary point of an object with a lens element of the matrix when recording an image

Из рисунка 1 очевидно, что:

$$\frac{\Delta_i}{m} = \frac{-X_A + p_i}{-Z_A}, \quad (2)$$

где m – расстояние от задней главной плоскости линзы до матрицы; p_i – расстояние между началом координат и изображением точки, построенным i -й линзой; прочие обозначения приведены ранее.

С учетом того, что $p_i = kt_{vc}$,

где

$$k = \begin{cases} i - \frac{1}{2} & \text{для четного числа линз в матрице} \\ i & \text{для нечетного числа линз в матрице} \end{cases}$$

уравнение (2) можно привести к виду:

$$\frac{\Delta_i}{m} = \frac{-X_A + kt_{vc}}{-Z_A}. \quad (3)$$

Неравенство (1) и уравнение (3) позволяют получить условие для ограничения шага линз в виде:

$$t_{vc} \geq \frac{2X_A m}{2mk + Z_A}. \quad (4)$$

Анализ неравенства (4) позволяет сделать вывод, что значение нижнего порога t_{vc} будет максимально для линзы растра с осью симметрии Z , когда $k = 0$. При этом неравенство (4) примет вид:

$$t_{vc} \geq \frac{2X_A m}{Z_A}. \quad (5)$$

Их условия (5) следует, что нижний (далее – первый нижний) предел шага линзового раstra видеосъемочной матрицы, обусловленный отсутствием ограничения поля зрения линзовых элементов, определяются координатами записываемой точки изображения и расстоянием между линзой и матрицей. Так как на рисунке 1 ось продольной координаты Z направлена от линзового раstra к цифровой матрице, координата Z_A записываемой точки A будет всегда отрицательной и знак порогового значения шага будет зависеть от знака поперечной координаты X_A точки A . Отрицательное значение порога (для положительных значений X_A , т.е. расположения точки A над осью Z) означает, что для точек, расположенных выше оси симметрии линзового раstra, ограничение шага по предотвращению появления ложной информации отсутствует. Соответственно, это условие надо принимать во внимание для точек, расположенных ниже оси симметрии линзового раstra.

Допустимые значения шага линзового раstra при отсутствии прерывности изображения по глубине

Зрительный анализатор человека не различает разность расстояний между точками по глубине сцены, если при переводе взгляда с одной точки на другую угол поворота глазных яблок составляет менее $30''$ [6]. Такой предельный угол поворота называется предельно малым углом диспаратности $d\alpha$. Модуль линейного порога dZ зависит не только от значения углового порога $d\alpha$, но и от расположения зрителя и его глазного базиса (расстояния между центрами вращения глазных яблок) [6]:

$$dZ = \frac{Z_{eye}^2 d\alpha}{B_{eye}}, \quad (6)$$

где Z_{eye} – расстояние между зрителем и рассматриваемой точкой; B_{eye} – глазной базис; $d\alpha$ – предельно малый угол диспаратности, выраженный в радианах.

Из условия (6) следует, что зрительный анализатор человека будет воспринимать дискретное по глубине изображение непрерывным, если расстояние по глубине между дискретными элементами не будет превышать dZ . Следовательно, при воспроизведении объемного изображения методом интегральной фотографии для его непрерывности по глубине необходимо, чтобы

расстояние вдоль оси линзовых элементов между воспроизводимыми точками не превышало линейный порог dZ .

На рисунке 2 представлена схема воспроизведения объемного изображения точек A и B , расположенных вдоль оптической оси линзовых элементов, и их наблюдения зрительным анализатором человека, причем расстояние AB не превышает пороговое значение dZ .

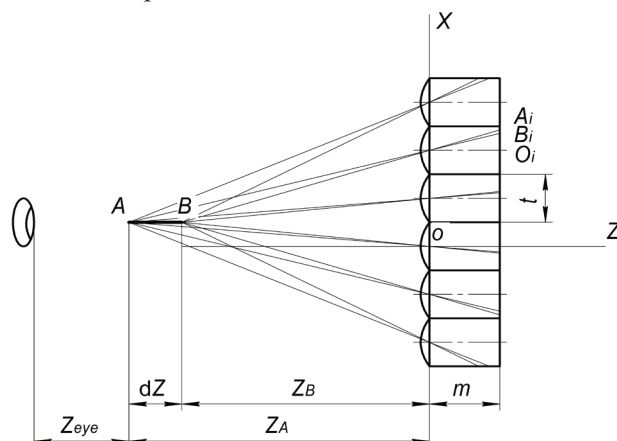


Рисунок 2 – Схема воспроизведения объемного изображения точек A и B , расположенных вдоль оптической оси линзовых элементов, и их наблюдения зрительным анализатором человека

Figure 2 – Diagram of reproducing a three-dimensional image of points A and B located along the optical axis of lens elements, and observing them with a human's visual system

Так как линзовая матрица представляет из себя дискретную систему, то запись объемного изображения осуществляется как совокупность отдельных плоских изображений, снятых из разных точек. При этом возможен случай, когда изображение одной из точек A и B не воспроизведется на матрице одной и той же линзой, что может вызвать дефект при воспроизведении A и B , а следовательно, и прерывистость изображения по глубине. Поэтому, чтобы воспроизвести точки A и B , соответствующие линейному порогу dZ в пространстве по их изображениям на матрице, необходимо, чтобы расстояние между их изображениями A_i и B_i не превышало шаг проекционного линзового раstra t , т.е.:

$$\Delta_{A_i} - \Delta_{B_i} \leq t. \quad (7)$$

Найдем связь между значениями AB и $A_i B_i$. Из рисунка 2 следует:

$$\frac{\Delta_{A_i}}{m} = \frac{-X_A + p_{pr}}{-Z_A},$$

где Δ_{A_i} – расстояние от оси симметрии i -й линзы до i -го изображения точки A , равное $O_i A_i$ на рисунке 2; i – номер линзы, начиная от начала координат; $p_{i_{pr}}$ – расстояние между осью Z на рисунке 2 и осью i -й линзы; X_A и Z_A – координаты точки A ; m – расстояние от задней главной плоскости линзы до матрицы.

Отсюда:

$$\Delta_{A_i} = \frac{(-X_A + p_{i_{pr}})m}{-Z_A}. \quad (8)$$

Аналогично для точки B с учетом:

$$-dZ - Z_B = -Z_A \quad (9)$$

получаем:

$$\Delta_{B_i} = \frac{(-X_B + p_{i_{pr}})m}{-Z_A - dZ}, \quad (10)$$

где X_B и Z_B – координаты точки B .

Расстояние между изображениями A_i и B_i точек A и B можно найти как разность правых частей формул (8) и (10). С учетом того, что:

$$p_{i_{pr}} = kt_{vc}, \quad X_A = X_B,$$

подстановка этой разности в неравенство (7) позволяет получить условие непрерывности изображения по глубине в виде:

$$t \geq \frac{X_A m dZ}{mkdZ - Z_A(Z_A + dZ)}. \quad (11)$$

Неравенство (11) получено для проекционной матрицы. Чтобы сформулировать требования к матрице для видеосъемки, необходимо привести шаг проекционной матрицы к шагу видеосъемочной с учетом масштаба увеличения M при проекции:

$$M = \frac{t}{t_{vc}}, \quad (12)$$

где t – шаг проекционной матрицы; t_{vc} – шаг видеосъемочной матрицы.

При сохранении геометрического подобия записываемого и воспроизводимого изображений отношения координат X_{pr} , Y_{pr} точки воспроизводимого проекционной матрицей изображения и координат X_{vc} , Y_{vc} точки записываемого видеосъемочной матрицей объекта, а также отношение расстояний m_{pr} и m_{vc} между соответствующими линзами и матрицами должно быть постоянным и равным масштабу увеличения M [6]. С учетом вышеизложенного, неравенство (11) принимает вид:

$$t \geq \frac{X_A m}{\left(mk - Z_A \left(1 + \frac{Z_A M}{dZ} \right) \right)}, \quad (13)$$

где X_A и Z_A – координаты записываемой точки A при видеосъемке; m – расстояние между видеосъемочными линзой и матрицей.

Анализ неравенства (13) позволяет сделать вывод, что значение нижнего порога t_{vc} , как и в случае неограниченного поля зрения линз, максимально для линзы раstra, расположенной на оси симметрии Z (при $k = 0$). При этом неравенство (13) примет вид:

$$t \geq \frac{-X_A m}{Z_A \left(1 + \frac{Z_A M}{dZ} \right)}, \quad (14)$$

где dZ вычисляется по формуле (6) и зависит от расстояния Z_{eye} между наблюдателем и точкой воспроизводимого изображения.

Из выражения (14) следует, что этот нижний (далее – второй нижний) предел шага линзового раstra при видеосъемке, обусловленный отсутствием прерывности изображения по глубине, зависит от координат записываемой точки изображения, расстояния от наблюдателя до этой точки, расстояния между видеосъемочными линзой и матрицей, а также от масштаба увеличения при проекции. Так как при различных сочетаниях значений параметров в правой части неравенства (14) второй нижний предел может принимать как положительные, так и отрицательные значения, значит, существуют области параметров из правой части неравенства (14), при которых ограничение по второму пределу отсутствует.

Допустимые значения шага линзового раstra при отсутствии прерывности изображения в поперечном направлении

Аналогично случаю прерывности изображения по глубине возможен вариант, когда при проекции изображения двух точек снятого объекта, лежащих на отрезке, перпендикулярном оптической оси линз, не воспроизведутся одной линзой (рисунок 3). Наблюдатель не заметит данного дефекта, если длина отрезка, образованного такими «исчезнувшими» точками, не превышает линейный предел разрешения зрительного анализатора dX в поперечном направлении. Поэтому для предотвращения дефекта «прерывистость

изображения в поперечном направлении» необходимо, чтобы промежутки между дискретно воспроизводимыми точками K, A, B, C, D (рисунок 3) не превышали линейный предел dX . Значение этого предела определяется предельным угловым разрешением γ зрительного анализатора, равным $1'$ [6], и расстоянием Z_{eye} между зрителем и рассматриваемой точкой. Вышеуказанные величины связаны зависимостью:

$$dX = Z_{eye} \gamma, \quad (15)$$

где γ выражается в радианах.

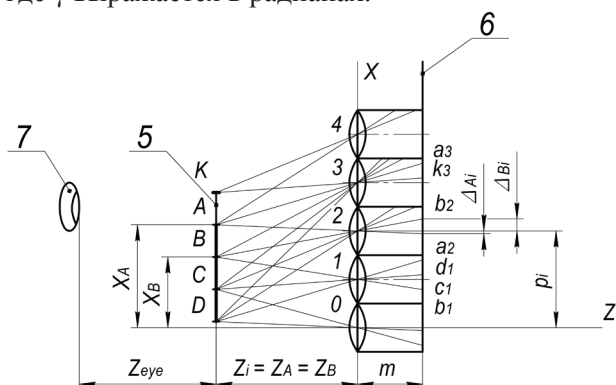


Рисунок 3 – Схема воспроизведения объемного изображения точек на отрезке, перпендикулярном оптической оси линзовых элементов, и их наблюдения зрительным анализатором человека: 1, 2, 3, 4 – линзовые элементы; 5 – отрезок, где расположены объемные изображения точек; 6 – матрица воспроизведения; 7 – глаз наблюдателя

Figure 3 – Diagram of reproducing a three-dimensional image of points on a segment perpendicular to the optical axis of lens elements, and observing them with a human's visual system: 1, 2, 3, 4 – lens elements; 5 – section where three-dimensional images of points are located; 6 – reproduction matrix; 7 – the eye of the observer

Следовательно, необходимым условием для отсутствия прерывистости при изменении ракурса является воспроизведение одной линзой изображений (например, a_2 и b_2 на рисунке 3) двух точек (например, A и B на рисунке 3), составляющих линейный порог разрешения зрительного анализатора, т.е. расстояние между этими изображениями не должно превышать шаг линзового растра:

$$\Delta_{B_i} - \Delta_{A_i} \leq t, \quad (16)$$

где Δ_{A_i} – расстояние от оси симметрии i -й линзы до i -го изображения точки A ; Δ_{B_i} – расстояние от оси симметрии i -й линзы до i -го изображения точки B ; t – шаг линзового растра.

Значения Δ_{A_i} и Δ_{B_i} принимаются положительными, если отрезки Δ_{A_i} и Δ_{B_i} расположены над осью линзы и отрицательными, если под осью. Значения Δ_{A_i} и Δ_{B_i} из рисунка 3 равны:

$$\Delta_{A_i} = -\frac{(-X_A + p_{i_{pr}})m}{-Z_i}; \quad (17)$$

$$\Delta_{B_i} = \frac{(-X_B + p_{i_{pr}})m}{-Z_i}, \quad (18)$$

где p_i – расстояние между осью Z и осью i -й линзы; X_A и X_B – вертикальные координаты точек A и B ; m – расстояние от задней главной плоскости линзы до матрицы.

Очевидно, что:

$$X_A = X_B + dX, \quad (19)$$

$$Z_B = Z_A = Z_i, \quad (20)$$

где Z_A и Z_B – горизонтальные координаты точек A и B .

С учетом формул (12, 17–20), связи параметров видеосъемочной и проекционной матриц и в результате дальнейших преобразований выражение (16) примет вид:

$$t_{vc} \geq \frac{mdX}{-MZ_i}, \quad (21)$$

где t_{vc} – шаг видеосъемочной матрицы; M – масштаб увеличения при проекции; dX вычисляется по формуле (15).

Анализ неравенства (21) показывает, что нижний (далее – третий нижний) предел шага линзового растра при видеосъемке, обусловленный отсутствием прерывности изображения в поперечном направлении, зависит от продольной координаты Z_B записываемой точки изображения, расстояния от наблюдателя до этой точки, расстояния между видеосъемочными линзой и матрицей, а также от масштаба увеличения при проекции и не зависит от поперечной координаты точки X_B . Так как координата Z_A всегда отрицательна, по аналогии с первым ограничением и с учетом отрицательного знака в правой части неравенства (21) для точек, расположенных ниже оси симметрии линзового растра, ограничение шага по предотвращению ложной информации отсутствует. Соответственно, это условие надо принимать во внимание для точек, расположенных выше оси симметрии линзового растра.

Допустимые значения шага линзового растра при незаметности линзовых элементов матрицы воспроизведения

Чтобы линзовая матрица была незаметна наблюдателю при воспроизведении, необходимо, чтобы шаг воспроизводящего линзового растра не превышал линейный предел разрешения dZ_{dist} зрительного анализатора наблюдателя, причем:

$$dZ_{dist} = Z_{dist} \gamma, \quad (22)$$

где Z_{dist} – расстояние между зрителем и воспроизводящим линзовым растром; γ – предельное угловое разрешение зрительного анализатора, равное $1'$ [6].

Очевидно, что:

$$Z_{dist} = Z_{eye} + |Z_A|, \quad (23)$$

где Z_{eye} – расстояние между зрителем и рассматриваемой точкой; Z_A – продольная координата точки A относительно проекционного линзового растра.

В результате подстановки (23) в (22) и перехода от проекционной матрицы к видеосъемочной с учетом масштаба M увеличения при проекции возможно получить неравенство для ограничения шага видеосъемочной матрицы сверху:

$$t_{vc} \leq \gamma \left(\frac{Z_{eye}}{M} + |Z_A| \right), \quad (24)$$

где Z_A – продольная координата точки A относительно видеосъемочного линзового растра, γ выражается в радианах.

Так как правая часть неравенства (24) всегда положительна, ограничение по верхнему пределу в соответствии с неравенством (24) надо принимать во внимание при любых значениях координат записываемой точки.

Анализ совокупности условий, ограничивающих шаг линзовой матрицы

Анализ четырех неравенств (5, 14, 21, 24), ограничивающих шаг линзового растра при видеосъемке для предотвращения искажений, показывает, что значение шага зависит от четырех групп параметров. Первая группа связана с другими параметрами линзового растра (расстояние m от задней главной плоскости линзы растра до цифровой матрицы зависит от фокусного расстояния линзы). Вторая группа определяется расположением объектов съемки (координаты точки записываемого объекта X_A и Z_A). Третья группа

включает параметры, связанные с устройствами для воспроизведения изображения (масштаб увеличения M при проекции). Четвертая определяется условиями наблюдения и содержит как варьируемые в полной мере параметры (расстояние Z_{eye} между зрителем и рассматриваемой точкой), так и параметры, которые незначительно отличаются у отдельных наблюдателей, и при расчетах используются их средние значения (глазной базис B_{eye} , предельное угловое разрешение γ зрительного анализатора, предельно малый угол диспаратности α). Из вышеизложенного следует, что при выборе шага линзового растра необходимо согласовывать его с другими параметрами растра: фокусным расстоянием линз, расстоянием до цифровой матрицы. Необходимо также иметь сведения о размерах экранов для проекции, расположении зрителя относительно проекционных устройств. Кроме того, требуется информация о размерах и расположении снимаемого объекта относительно устройства для видеосъемки.

Исследование неравенств (5, 14, 21, 23) позволяет сделать вывод, что первые три условия ограничивают шаг снизу, а последнее – сверху. Так как условие (5) надо принимать во внимание для точек, расположенных ниже оси симметрии линзового растра, а условие (23) – для точек, расположенных выше оси симметрии линзового растра, то для точек, лежащих выше оси симметрии матрицы, необходимо решать систему неравенств (16, 21, 24), а для точек, лежащих ниже оси симметрии матрицы, – систему (5, 14, 24).

В качестве примера использования разработанной методики были рассчитаны зависимости четырех вышеперечисленных значений порогов от координаты Z_A , перпендикулярной плоскости матрицы, при следующих фиксированных значениях параметров: $m = 20$ мм, $M = 10$, $Z_{eye} = 2000$ мм, $X_A = 100$ мм. Координаты Z_A были заданы в диапазоне от -500 мм до -200 мм. Анализ результатов расчета позволил заключить, что в данном случае диапазон допустимых значений шага растра ограничивается неравенствами (21) снизу и (24) сверху. Графики зависимости пороговых значений шага t_{vc} линзового растра видеосъемочной матрицы от продольной координаты Z_A записываемой точки A представлены на рисунке 4, причем график нижней границы допустимых значений показан сплошной красной линией, а график верхней границы – пунктирной синей.

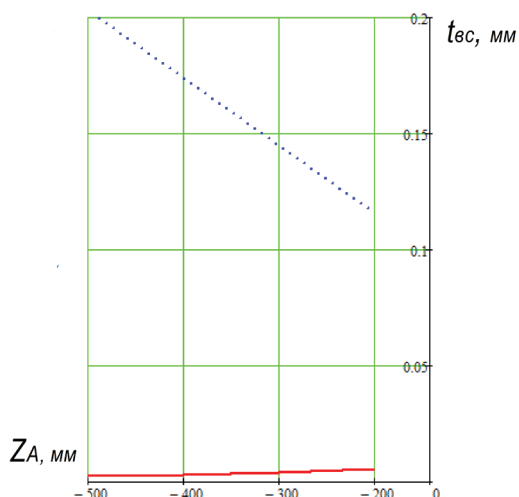


Рисунок 4 – Графики зависимости пороговых значений шага t_{vc} линзового раstra от координаты Z_A при фиксированных значениях других параметров (приведены выше)

Figure 4 – Graphs of the dependence of the threshold values of the pitch t_{vc} of the lenticular raster on coordinate Z_A with fixed values of other parameters (given above)

Из рисунка видно, что при фиксированных значениях других параметров по мере приближения записываемой точки к видеосъемочной матрице диапазон допустимых значений шага линзовой матрицы сужается. В большей степени это сужение обусловлено более быстрым падением верхнего предела, чем ростом нижнего. Так как для более удаленных точек диапазон шире, то можно сделать вывод, что если шаг раstra корректно выбран для самой близкой точки видеосъемки, то это значение шага будет приемлемо и для более удаленных точек.

Заключение

Обоснована актуальность проблемы исследования допустимых параметров линзового раstra для предотвращения возможных искажений при записи и воспроизведении изображений методом интегральной фотографии. Приведен перечень возможных проявлений искажений, указаны конкретные причины возникновения каждого вида искажений. Сформулированы требования к шагу линзовой матрицы, исходя из исключения возможности появления этих искажений.

В результате исследований оказалось, что шаг линзового раstra лимитируется четырьмя вышеприведенными неравенствами, причем первые три из них ограничивают значение шага

снизу, а четвертое – сверху. Произведен анализ совокупности условий, ограничивающих шаг линзовой матрицы. Границы допустимых значений шага зависят от четырех групп параметров, связанных с другими размерами раstra, расположением объектов съемки, параметрами воспроизведения и наблюдения. Приведен результат использования методики в виде зависимости допустимого диапазона шага линзового раstra от поперечной координаты записываемой точки при фиксированных значениях других параметров.

Список использованных источников

1. Dufaux, F. Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering / F. Dufaux, B. Pesquet-Popescu, M. Cagnazzo. – UK, Chichester : Wiley& Sons, Ltd., 2013. – 518 p.
2. Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display / B. Javidi, F. Okano, J.-Y. Son (Eds.) // Springer Science+Business Media, LLC. – 2009. Mode of access: <https://www.springer.com/us/book/9780387793344>. – Date of access: 04.09.2016. DOI: 10.1007/978-0-387-79335-1
3. Кондратьев, Н.В. Особенности формирования объемного изображения в цифровом стереоскопическом кинематографе / Н.В. Кондратьев, Н.В. Елхов, Ю.Н. Овечкис, Л.В. Паутова // Мир техники кино. – 2011. – № 2. – С. 4–8.
4. Кондратьев, Н.В. Цифровой синтез многокурсных стереоскопических изображений для безочковой растровой демонстрации / Н.В. Кондратьев, Н.В. Елхов, Ю.Н. Овечкис, Л.В. Паутова // Мир техники кино. – 2012. – № 2. – С. 21–25.
5. Mishina, X. Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography / X. Mishina, M. Okui, F. Okano // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, issue 17. – P. 4026–4036. DOI: 10.1364/AO.45.004026
6. Дудников, Ю.А. Растровые системы для получения объемных изображений / Ю.А. Дудников, Б.К. Рожков. – Л. : Машиностроение, Ленинградское отд., 1986. – 216 с.
7. Способ преобразования инфракрасного изображения объекта в видимое объемное и устройство для его осуществления: патент № 14668 Республики Беларусь / Е.Г. Зайцева, С.А. Саракач // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 4. – С. 128.
8. Способ селективного нагрева объектов инфракрасным излучением: патент № 19110 Республики Беларусь / Е.Г. Зайцева // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 2. – С. 103.
9. Чафонова, В.Г. Автоматический контроль и цифровая коррекция масштаба и взаимного поворота изображений стереопары / В.Г. Чафонова,

И.В. Газеева, Г.В. Тихомирова // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, вып. 1. – С. 112–120. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-112-120

10. Желудев, Д.Е. Количественная оценка величины растровых искажений и геометрической точности воспроизведения деталей оригинала / Д.Е. Желудев // Дизайн. Материалы. Технология. – 2008. – № 2(5). – С. 24–27.

References

1. Dufaux F., Pesquet-Popescu B., Cagnazzo M. Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering, UK, Chichester, Wiley&Sons, Ltd., 2013, 518 p.

2. Javidi B., Okano F., Son J.-Y. (Eds.) Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display. Springer Science+Business Media, LLC, 2009. Mode of access: <https://www.springer.com/us/book/9780387793344>. Date of access: 04.09.2016. DOI: 10.1007/978-0-387-79335-1

3. Kondratyev N.V., Elhov N.V., Ovechkis Yu.N., Pautova L.V. [Features of the formation of three-dimensional image in digital stereoscopic cinema]. *World of cinema technology*, 2011, no. 2, pp. 4–8 (in Russian).

4. Kondratyev N.V., Elhov N.V., Ovechkis Yu.N., Pautova L.V. [Digital synthesis of multi-angle stereoscopic images for aglasses-free raster demonstration]. *World of cinema technology*, 2012, no. 2, pp. 21–25 (in Russian).

5. Mishina X., Okui M., Okano F. Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography. *Applied Optics*, 2006, vol. 45, is. 17, pp. 4026–4036. DOI: 10.1364/AO.45.004026

6. Dudnikov A.Y., Rozhkov B.K. *Rastrovye sistemy dlya polucheniya ob'emnykh izobrazhenii* [Raster Systems for Stereoscopic Imaging]. Leningrad, Mechanical engineering Publ., Leningradbranch, 1986, 216 p. (in Russian).

7. Zaytseva E.G., Sarakach S.A. *Sposob preobrazovaniya infrakrasnogo izobrazheniya ob'ekta v vidimoe ob'emnoe i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of converting an infrared image of an object into a volumetric visible and a device for its implementation]. Patent RB, no. 14668, 2011.

8. Zaytseva E.G. *Sposob selektivnogo nagreva ob'ektov infrakrasnym izlucheniem* [The method of selective heating of objects by infrared radiation]. Patent RB, no. 19110, 2015.

9. Chafonova V.G., Gazeeva I.V., Tikhomirova G.V. [Automatic control and digital correction of scale and rotation mismatch in stereo pairs]. *Computer optics*, 2016, vol. 40, is. 1, pp. 112–120 (in Russian). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-112-120

10. Zheludev D.E. [Quantitative assessment of the magnitude of raster distortion and the geometric accuracy of reproducing the details of the original]. *Design. Materials. Technology*, 2008, no. 2(5), pp. 24–27 (in Russian).