

ТРЕХМЕРНАЯ ОПТИКА

УДК 621.397.13

А. П. Якимович

(Москва)

ТРЕХМЕРНЫЕ МОНИТОРЫ
С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ СЦЕНЫ И
УМЕНЬШЕННЫМ ЧИСЛОМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РАКУРСОВ

С целью уменьшения требований к элементам трехмерного монитора рассматривается возможность уменьшения числа вертикальных ракурсов в создаваемом им объемном изображении. Это позволяет настолько снизить требования к дефлектору оптической кадровой развертки и светоизлучающей матрице монитора, что они удовлетворяются современной элементной базой. Для сохранения достаточных размеров зоны наблюдателя предлагается астигматическая оптическая схема монитора. Однако при этом наблюдается некоторое снижение разрешения по вертикали и уменьшение яркости изображения.

Введение. Как один из путей создания объемного телевидения рассматриваются и исследуются методы сканирования [1—5], подразумевающие получение от реальной сцены ряда изображений ее сечений, их передачу и затем восстановление для наблюдателя объемного изображения в виде совокупности сечений. Среди этих методов весьма перспективным является метод горизонтальных сечений [4, 5], так как он позволяет восстанавливать достаточно большое число вертикальных и горизонтальных ракурсов сцены, не требует существенного увеличения ширины полосы канала связи и совместим с обычным телевидением. В этом методе трехмерный монитор высвечивает на горизонтально расположенной светоизлучающей матрице последовательность изображений горизонтальных сечений сцены, которые рассматриваются наблюдателем с помощью дефлектора оптической кадровой развертки, развертывающего сечение в пространстве по вертикали. Практическую реализацию этого метода сдерживают высокие требования к элементам монитора. Так, необходима значительная апертура (20—30 см) и большой угол сканирования ($> 30^\circ$) дефлектора, так как эти параметры определяют размеры окна наблюдения и угловые размеры изображения. Кроме того, для восстановления изображений горизонтальных сечений, параллельных лучу зрения наблюдателя, светоизлучающая матрица (СИМ) должна излучать преимущественно в тангенциальном к ее поверхности направлении, тогда как перспективные СИМ (например, матрицы лазеров, диодов или жидкокристаллических ячеек) излучают преимущественно в нормальном направлении.

Настоящая работа посвящена поиску путей снижения вышеуказанных требований к элементам 3D-монитора. Как будет показано, отказ от передачи в восстановленном изображении части вертикальных ракурсов позволяет упростить эти требования до такой степени, что они могут быть удовлетворены на современном технологическом уровне. Далее будут рассмотрены два варианта 3D-монитора с уменьшенным числом вертикальных ракурсов, отлича-

ющиеся степень упрощения требований к элементам. В работе выясняется также влияние снижения числа вертикальных ракурсов на качество и разрешение восстановленного монитором изображения.

Трехмерный монитор с уменьшенной вертикальной апертурой. Естественный и очевидный путь снижения требований к элементам 3D-монитора за счет сокращения числа вертикальных ракурсов изображения состоит в уменьшении по вертикали выходной апертуры монитора и соответственно вертикальных размеров всех его элементов. На рис. 1 показано вертикальное сечение оптической схемы такого модифицированного монитора, который отличается от базового [4] тем, что в нем после узкого сегмента объектива L_1 установлена цилиндрическая рассеивающая линза L_2 , а дефлектор оптической кадровой развертки D удален от линзы L_2 на некоторое расстояние l , существенно большее вертикальной апертуры элементов монитора A . Как будет показано, такая реализация оптической схемы монитора позволяет значительно снизить требования к диаграмме направленности излучения СИМ.

Рассмотрим восстановление изображения сечения сцены в этом мониторе для наблюдателя, находящегося непосредственно за дефлектором. Изображение сечения сцены высвечивается на СИМ, находящейся в плоскости S_0 , которая существенно наклонена к оптической оси объектива L_1 так, что его апертура достаточно хорошо освещается излучением СИМ. Объектив L_1 преобразует это действительное изображение сечения в мнимое, находящееся в плоскости S_1 , которая также существенно наклонена к оптической оси системы. Цилиндрическая линза L_2 изменяет кривизну волнового фронта от точек изображения S_1 в вертикальном направлении. Например, точка T_1 после преобразования линзой L_2 будет иметь мнимый фокус по вертикали в точке T'_1 , а по горизонтали цилиндрическая линза никакого преобразования не производит и мнимый фокус рассматриваемой точки по этой координате остается в точке T_1 . Поскольку при бинокулярном наблюдении для восприятия глубины основное значение имеет фокусировка точек изображения по горизонтали [6], наблюдатель будет видеть мнимое изображение точки T_1 в точке T_2 , расстояние до которой и ее угловая координата по горизонтали равны соответствующим координатам точки T_1 , а ее угловая координата по вертикали равна вертикальной угловой координате точки T'_1 . Легко видеть, что с помощью линзы L_2 изображение сечения из плоскости S_1 преобразуется при восприятии наблюда-

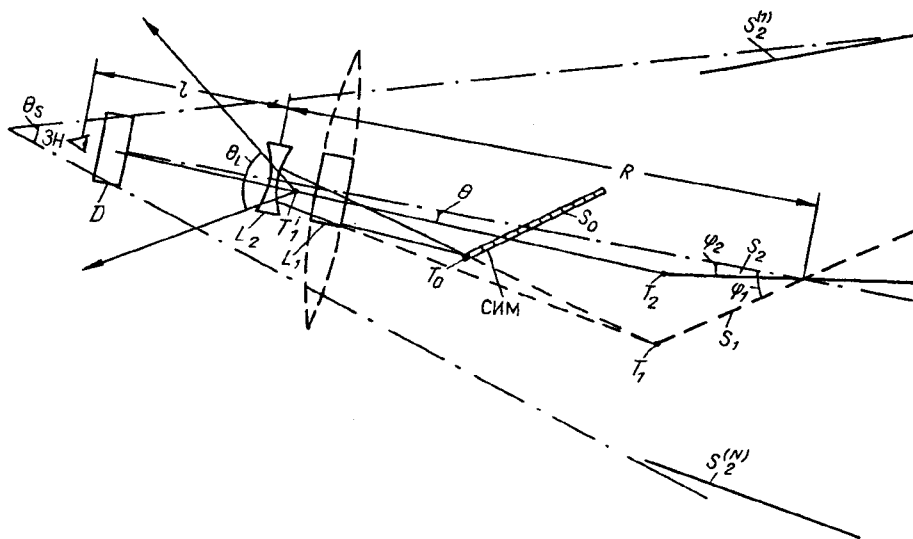


Рис. 1

телем в плоскость S_2 . Отношение углов наклона к оптической оси монитора плоскостей S_2 и S_1 соответственно φ_2 и φ_1 определяется выражением

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{f_2(R + l)}{lR} \sim \frac{f_2}{l}, \quad (1)$$

где f_2 — фокусное расстояние цилиндрической линзы; l — расстояние от линзы до наблюдателя; R — расстояние до точки пересечения плоскостей S_1 и S_2 с оптической осью системы.

Как следует из (1), при малом фокусном расстоянии линзы L_2 плоскость S_2 почти параллельна оптической оси системы. Таким образом, введение в монитор цилиндрической рассеивающей линзы позволяет использовать в нем СИМ, имеющие узкую, близкую к нормали диаграмму направленности излучения, и тем не менее восстанавливать достаточно хорошее горизонтальное сечение сцены, почти параллельное лучу зрения. Однако это приводит к некоторой потере яркости изображения по сравнению с базовым монитором, в котором дефлектор установлен непосредственно за объективом L_1 . Отношение яркости изображения в модифицированном J_M и базовом J_6 мониторах можно оценить как

$$\frac{J_M}{J_6} = \frac{A}{\Theta_L l} \sim \frac{f_2}{l}, \quad (2)$$

где Θ_L — угловая расходимость светового пучка за цилиндрической линзой.

Как видно, уменьшение угла наклона к оптической оси монитора плоскости воспринимаемого изображения сечения S_2 в l/f_2 раз достигается потерей яркости изображения в такое же число раз. Кроме того, введение в оптическую схему монитора цилиндрической линзы приводит к некоторой потере разрешения по вертикали, что обусловлено астигматизмом оптической схемы и психофизиологическими особенностями зрительного восприятия человека. Этот вопрос будет подробно рассмотрен в последнем разделе статьи.

При работе монитора дефлектор развертывает изображения сечений по вертикали в пространстве, ограниченном крайними сечениями $S_2^{(1)}$ и $S_2^{(N)}$ (см. рис. 1). Легко видеть, что зона наблюдателя (ЗН), т. е. область пространства, из которой видны одновременно все сечения, представляет собой конус, опирающийся на выходную апертуру дефлектора и имеющий угол при вершине, равный угловым размерам изображения сцены Θ_s . При малой апертуре дефлектора, которая может быть порядка диаметра зрачка глаза человека, необходимо использовать дополнительную оптическую схему для формирования широкой по вертикали зоны наблюдателя. Для этого можно использовать проекцию объемного изображения из апертуры дефлектора на диффузно рассеивающий в вертикальном направлении линзорастровый или голографический экран [7]. Однако такая проекция приводит к дополнительной потере разрешения по вертикали. В случае узкополосного спектра излучения СИМ можно использовать для проекции многофокусную линзу-голограмму или комбинацию обычного объектива и многопорядковой дифракционной решетки. Тогда при проекции световой пучок от монитора расщепляется объективом на ряд выходных пучков, что создает ряд тождественных зон наблюдения изображения. В каждой такой зоне ракурсы меняются непрерывно, а при переносе наблюдения из одной зоны в другую все изображение смещается скачком на высоту одной зоны наблюдения. Однако глубина суммарной зоны наблюдателя при такой проекции не увеличивается и как прежде определяется апертурой дефлектора и угловыми размерами изображения.

Обсудим теперь возможности создания дефлектора оптической кадровой развертки для рассмотренного монитора на современной технологической базе. Наиболее удобные с точки зрения управления и синхронизации акустооптические дефлекторы при частоте кадровой развертки 50 Гц позволяют получить апертуру дефлектора по вертикали порядка сантиметра и угловые размеры изображения порядка $5-10^\circ$ [8, 9]. Однако трудность создания доста-

точно широких АО-ячеек, обеспечивающих широкую зону наблюдателя по горизонтали, необходимость использования дополнительной оптической системы для увеличения угловых размеров изображения по вертикали, а также некоторое ухудшение параметров дефлектора при сканировании расходящихся пучков снижают перспективы использования в ближайшие годы акустооптических дефлекторов в 3D-мониторе.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны электромеханические дефлекторы [10, 11]. Дефлекторы на основе вращающихся зеркальных призм позволяют легко получать требуемые кадровую частоту и угловые размеры изображения при апертуре дефлектора по вертикали порядка нескольких сантиметров и для любой апертуры по горизонтали, однако их развертка имеет несколько худшую «пилообразность», чем у дефлекторов на сканирующих гальванометрах [12]. Последние дефлекторы в настоящее время имеют достаточно хорошие параметры при размерах зеркала порядка нескольких квадратных сантиметров, но поскольку в требуемом дефлекторе апертура зеркала вытянута вдоль оси его колебаний, то можно утверждать, что дефлектор для рассмотренного 3D-монитора может быть также изготовлен и на основе сканирующего гальванометра.

Монитор с бегущей выходной апертурой. Рассматриваемый ниже монитор восстанавливает изображение более высокого качества и с более глубокой зоной наблюдателя по сравнению с предыдущим, но имеет несколько усложненную конструкцию дефлектора оптической кадровой развертки. На рис. 2, *a, b* показано вертикальное сечение оптической схемы этого монитора, в котором роль дефлектора выполняет цилиндрическая линза L_2 , движущаяся в вертикальном направлении. При фиксированном положении цилиндрической линзы L_2 монитор восстанавливает изображение сечения совершенно аналогично вышерассмотренному. Первичное изображение сечения S_0 высвечивается на светоизлучающей матрице СИМ, объектив L_1 преобразует его в мнимое изображение S_1 , а линза L_2 — в изображение S_2 , почти параллельное оптической оси системы. Как и в вышерассмотренном мониторе, угол наклона плоскости S_2 в l/f_2 раз меньше угла наклона плоскости S_1 (l — расстояние от цилиндрической линзы до наблюдателя) и наблюдается соответствующее снижение яркости изображения в l/f_2 раз. При работе монитора линза L_2 движется через апертуру линзы L_1 сверху вниз и развертывает сечения в пространстве по вертикали. На рис. 1 показано, что в позиции линзы $L_2^{(1)}$ наблюдатель видит

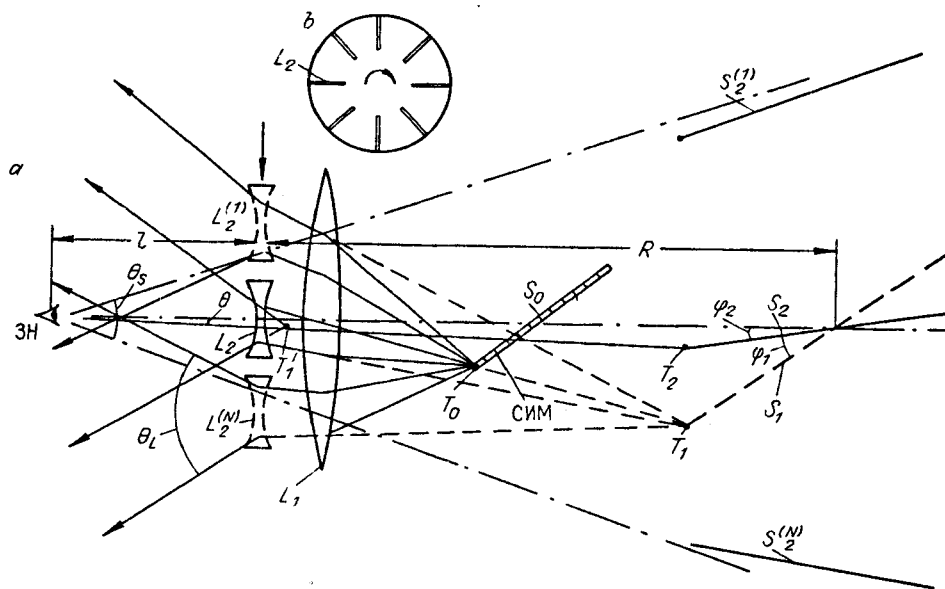


Рис. 2

мнимое изображение сечения в плоскости $S_2^{(1)}$, а в позиции линзы $L_2^{(N)}$ — в плоскости $S_2^{(N)}$.

В рассматриваемом мониторе ЗН ограничена пересекающимися боковыми лучами световых пучков для крайних положений линзы L_2 (см. рис. 2, а, б). Вертикальное сечение зоны наблюдателя имеет вид расходящегося конуса, а горизонтальное — вид пирамиды, основание которой определяется длиной цилиндрической линзы. В принципе глубина зоны наблюдателя не ограничена, однако с точки зрения качества изображения наиболее оптимальная область зоны наблюдателя находится вблизи точки пересечения плоскостей $S_2^{(1)}$ и $S_2^{(N)}$, которая соответствует точке получения информации от реальной сцены [4]. Для того чтобы эта точка находилась в зоне наблюдателя, угловая расходимость световых пучков после цилиндрической линзы Θ_L должна превышать угловые размеры изображения по вертикали Θ_s . При изменении точки наблюдения в зоне наблюдателя по вертикали, во-первых, смена ракурсов изображения происходит медленнее, чем при наблюдении реальной сцены или изображения, построенного базовым монитором, и, во-вторых, наблюдается угловое смещение всего изображения в направлении, обратном направлению изменения точки наблюдения. Когда ширина цилиндрической линзы приближается к диаметру зрачка глаза человека, то смены ракурсов по вертикали не происходит, а угловое смещение всего изображения равно угловому смещению точки наблюдения.

Рассмотрим теперь возможность создания дефлектора в виде бегущей линзы. Такой дефлектор может быть реализован на основе вращающегося диска, на котором установлено несколько (n) цилиндрических линз, как это показано на рис. 2, б. Расстояние между линзами A_1 определяет размеры окна наблюдения по вертикали и равно апертуре объектива L_1 , частота вращения диска меньше частоты регенерации изображения в n раз. Например, при радиусе диска $R = 40$ см и $A_1 = 20$ см имеем $n = 12$. При частоте регенерации 50 Гц получается скорость вращения диска $\sim 4,16$ оборотов в секунду. Отметим, что ввиду того что при вращении диска цилиндрическая линза движется непараллельно своей образующей, окно наблюдения представляет собой часть сектора с углом между верхней и нижней сторонами $360^\circ/n$ и, кроме того, восстанавливаемые сечения «сжаты» в направлении к центру диска. Разумеется, если в 3D-видеокамере используется аналогичный дефлектор, с помощью которого считываются подобные сечения, то геометрические искажения объектов сцены отсутствуют.

Разрешение в изображении с уменьшенным числом вертикальных ракурсов. На рис. 3 показана упрощенная схема восстановления изображения, где Z_l, Z_n и C_l, C_n — зрачки хрусталиков и сетчатки левого и правого глаза наблюдателя; L_2 — выходная апертура монитора с цилиндрической рассеивающей линзой; O' — точка изображения, рассматриваемая наблюдателем. Согласно психофизиологическим законам зрительного восприятия [6], при

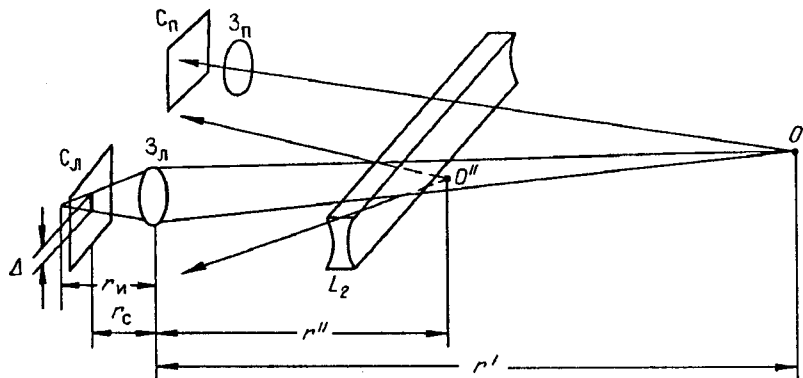


Рис. 3

наблюдении реальных сцен хрусталики глаз человека аккомодируются, т. е. принимают такое расстояние, когда на сетчатку четко фокусируется плоскость конвергенции или плоскость пересечения оптических осей глаз, в которой находится предмет или точка концентрации внимания наблюдателя. Поэтому при рассматривании наблюдателем точки O' изображения (см. рис. 3) на сетчатке будет четкое изображение плоскости, в которой находится точка O' , и достигается минимум пятна рассеяния изображения этой точки по горизонтали. Фокусное расстояние хрусталиков f_x связано при этом с расстояниями от хрусталика до рассматриваемой точки r' и сетчатки r_c формулой линзы

$$\frac{1}{f_x} = \frac{1}{r'} + \frac{1}{r_c} \quad (3)$$

Пусть рассеивающая линза создает мнимое изображение точки O' по вертикали на расстоянии r'' от хрусталика в точке O'' . Тогда минимум пятна рассеяния изображения точки O'' по вертикали находится за сетчаткой на расстоянии r_n от хрусталика, которое определяется из соотношения

$$\frac{1}{r_n} = \frac{1}{f_x} - \frac{1}{r''}, \quad (4)$$

а на сетчатке изображение точки O'' будет размытым по вертикали в виде некоторой вертикальной черточки Δ . Считая, что из апертуры хрусталика световые лучи распространяются в виде конуса с вершиной, находящейся от нее на расстоянии r_n (т. е. в приближении геометрической оптики), и используя геометрические соотношения и (3), (4), находим

$$\Delta = d \frac{r_c(r - r')}{rr'} \quad (5)$$

где d — диаметр зрачка глаза.

Для практики более удобна угловая величина разрешения, которая в нашем случае равна

$$\delta_b = \frac{\Delta}{r_c} = d \frac{(r - r')}{rr'} \quad (6)$$

Для количественной оценки разрешения рассмотрим изображение, создаваемое монитором с цилиндрической линзой, имеющей размеры по вертикали, сравнимые с диаметром зрачка глаза 5 мм, т. е. наихудший случай с точки зрения размера разрешения, но наиболее интересный для практики. В этом случае для получения достаточных угловых размеров окна наблюдения по вертикали фокусное расстояние цилиндрической линзы должно быть также порядка 5 мм. Тогда точка O'' практически совпадает с фокусом микролинзы для всех точек изображения, а расстояние r'' приблизительно равно расстоянию от глаз наблюдателя до монитора. На рис. 4 показана величина углового разрешения по вертикали δ_b в зависимости от расстояния до отображаемых объектов r' при различном расстоянии от наблюдателя до монитора r'' и при $d = 4$ мм. Сравним получаемое разрешение со стандартным угловым разрешением глаза человека

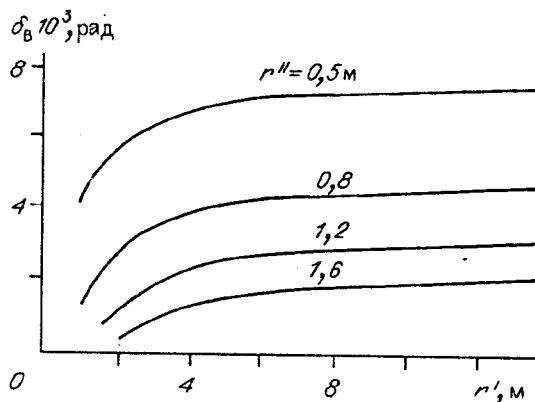


Рис. 4

$\delta = 1' \approx 3 \cdot 10^{-4}$ рад. Как видно, при малых $r'' \sim 0,5 \div 1$ м угловое разрешение по вертикали для изображений любых объектов более чем на порядок больше углового разрешения глаза. При увеличении расстояния от наблюдателя до монитора $r'' > 1$ м для изображений близких объектов $r' \sim 1 \div 2$ м разрешение в изображении будет уже $\sim 10^{-3}$ рад, что дает для угловых размеров изображения $45^\circ \approx 0,8$ рад примерно 800 элементов разрешения. Это сравнимо с телевизионным стандартом и вполне приемлемо для практики. С увеличением расстояния до отображаемых объектов разрешение падает и для ранее приведенных угловых размеров изображения составляет 300—400 элементов. Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемый путь создания трехмерных мониторов вполне пригоден для практики. Кроме того, возможны два пути повышения углового разрешения в изображении: за счет увеличения вертикальных размеров цилиндрической линзы с передачей части вертикальных ракурсов, а также использования дополнительных оптических элементов для коррекции астигматизма изображения.

Заключение. С целью снижения требований к элементам оптической схемы рассмотрены два варианта реализации 3D-монитора с уменьшенным числом вертикальных ракурсов в создаваемом ими объемном изображении и при сохранении достаточно большой зоны наблюдения. Первый из них предъявляет чрезвычайно простые требования к дефлектору оптической кадровой развертки, легко достижимые в настоящее время, но восстанавливает объемное изображение с малой глубиной зоны наблюдателя. Второй вариант восстанавливает объемное изображение, имеющее плавное изменение ракурсов в широкой и глубокой зоне наблюдателя, но несколько усложняет конструкцию дефлектора. Оба варианта используют астигматическую оптическую схему, что существенно снижает требования к светоизлучающей матрице и позволяет, применяя настоящие и перспективные светоизлучающие матрицы, воспроизводить почти горизонтальные сечения сцены. Однако эти достоинства рассмотренных мониторов достигаются ценой некоторой потери разрешения по вертикали, в особенности при восстановлении изображений удаленных объектов и за счет снижения яркости изображения.

Разумеется, предложенный путь создания 3D-мониторов с уменьшенным числом вертикальных ракурсов обусловлен возможностями современной элементной базы. Можно ожидать, что с улучшением элементной базы будет происходить постепенное увеличение числа воспроизводимых вертикальных ракурсов изображения до их предельного числа, наблюдаемого в реальных сценах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Traub A. C. // Appl. Opt. 1967. 6, N 6. P. 1675.
2. Пат. 3912856 США /S. W. Liddel. Оpubл. 14.10.75.
3. Якимович А. П. // Техника кино и телевидения. 1978. № 4.
4. Васильев Н. А., Компанец И. Н., Якимович А. П. // Радиотехника. 1991. № 9.
5. Якимович А. П. Способ передачи и восстановления широкоапертурных объемных изображений в методах зондирования сцены // Автометрия. 1993. № 4.
6. Валюс Н. А. // Стереодография, стереокино, стереотелевидение. М.: Искусство, 1986.
7. Okoshi T. // SPIE. 1977. 120. P. 102.
8. Балакшиев В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. // Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
9. Богданов С. В., Большова Т. А. Предельные параметры акустооптических дефлекторов на парателлурите // Автометрия. 1987. № 2.
10. Weiser L. // Laser Scanning Systems. Laser Application. N.Y.: Academic Press, 1974.
11. Чирков Л. Е., Фридлянд И. В., Бриллиантов Д. П. Новые устройства телевизионной развертки. М.: Радио и связь, 1984.
12. Look J. D. // Appl. Opt. 1974. 13, N 4. P. 875.

Поступила в редакцию 7 декабря 1994 г.