

УДК 691.397.13

А. П. Якимович

(Москва)

**ШИРОКОАПЕРТУРНЫЕ ДЕФЛЕКТОРЫ СВЕТА  
ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ КАДРОВОЙ РАЗВЕРТКИ  
ОБЪЕМНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ**

Рассматриваются дефлекторы света, выполненные в виде вращающегося диска или цилиндра на основе призм Френеля с непрерывно изменяющимися по поверхности параметрами. По сравнению с многогранными зеркалами при равной апертуре эти дефлекторы имеют значительно меньшие габариты и лучшую «пилообразность» рабочей характеристики. Вычислены основные aberrации таких дефлекторов и предложены способы их устранения или снижения. Определены параметры дефлекторов, удовлетворяющих требованиям оптической кадровой развертки объемного телевидения, основанного на сканировании сцены горизонтальными сечениями. Кроме того, показано, что в перспективе рассмотренные дефлекторы могут позволить создать 3D-мониторы с панорамным и даже круговым изображениями.

**Введение.** В работах [1—5] рассматривается один из возможных путей создания объемного телевидения (3D ТВ), основанный на оптическом сканировании пространства сцены горизонтальными сечениями. В этом методе каждое горизонтальное сечение сцены эквивалентно строке обычного ТВ, а оптическое сканирование — кадровой развертке обычного ТВ. Для совместимости 3D ТВ с обычным ТВ временные характеристики оптической развертки должны соответствовать ТВ-стандарту. Кроме того, согласно названным работам, апертура дефлектора оптической развертки определяет размеры окна наблюдения и должна быть весьма значительной, порядка 20—40 см, а полный угол сканирования определяет угловые размеры изображения и должен быть не меньше 30°. Последние два требования существенно ограничивают возможности использования известных дефлекторов света. Так, электрооптические, акустооптические дефлекторы, а также дефлекторы на модах деформаций пьезоэлементов принципиально не могут совместно удовлетворить этим двум требованиям [6]. В дефлекторах на основе рамочного гальванометра [7, 8] получаемая в настоящее время апертура не превышает нескольких сантиметров. Дефлекторы на основе вращающихся зеркальных барабанов и призм при малом числе граней не обеспечивают необходимой «пилообразности» характеристики, а при большом числе граней слишком громоздки [6, 9]. Весьма перспективным для создания требуемого дефлектора может оказаться использование индуцированных электрическим полем дифракционных решеток в тонких слоях жидких кристаллов. Это обусловлено компактностью подобных экспериментальных устройств и легкостью их управления [10, 11]. Однако для создания на их основе широкоапертурных дефлекторов необходимо преодолеть еще много технологических трудностей.

В настоящей работе рассматриваются широкоапертурные дефлекторы, выполненные на основе призм Френеля в виде вращающегося диска или цилиндра. Как будет показано, эти дефлекторы не только удовлетворяют требованиям оптической кадровой развертки в 3D ТВ, но и позволяют сделать некоторые новые шаги в развитии избранного метода 3D ТВ, в частности, дают

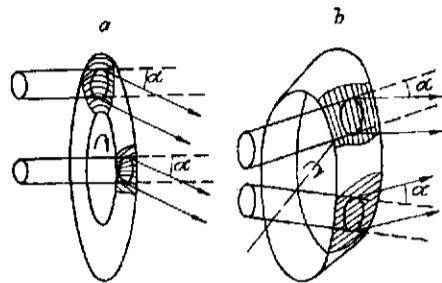


Рис. 1

возможность создавать несколько зон наблюдения изображения, а также панорамные и круговые изображения.

**Широкоапертурные дефлекторы света на основе кольцевых призм Френеля.** Рассматриваемые дефлекторы представляют собой вращающийся диск (рис. 1, *a*) или цилиндр (рис. 1, *b*), поверхность которых выполнена в виде призм Френеля. Дискový дефлектор может иметь как концентрические, так и радиальные ступени и соответственно отклонять падающий световой пучок в радиальном или тангенциальном на-

правлении. Цилиндрический дефлектор также может иметь круговые ступени или ступени, параллельные своей образующей, и отклонять световой пучок в направлении, параллельном или нормальном образующей. Главными особенностями рассматриваемых в настоящей работе дефлекторов является то, что их ступени рассчитаны таким образом, что угол отклонения светового пучка линейно зависит от угловой координаты рассматриваемого участка дефлектора, и, кроме того, повороту дефлектора на  $360^\circ$  соответствует один период развертки светового пучка. При сравнении с многогранными вращающимися зеркалами и призмами эти дефлекторы можно рассматривать как одну отклоняющую «грань», замкнутую в кольцо. Поэтому по сравнению с многогранными зеркалами при равных апертурах и углах сканирования они имеют значительно меньшие габариты и лучшую «пилообразность» развертки, однако требуют при этом увеличения частоты вращения.

В литературе подобные дефлекторы с непрерывно изменяющимися параметрами по поверхности отклоняющего элемента известны (например, голографические дефлекторы [12] или дефлекторы на основе синтезированных решеток [13]). В описанных применениях такие дефлекторы используются для отклонения по заданной траектории узких световых пучков. В этом случае вариациями угла отклонения по сечению пучка можно пренебречь. Содержание настоящей статьи связано со сканированием широкоапертурного пучка и с решением проблемы коррекции волнового фронта после дефлектора, или, иначе говоря, проблемы устранения aberrаций дефлектора. Эти aberrации обусловлены двумя причинами: непостоянством отклонения по апертуре сканируемого пучка и круговой симметрией отклоняющего элемента. Далее будут рассмотрены величина этих aberrаций и возможные пути их устранения или снижения.

**Аберрации дефлекторов света с кольцевой отклоняющей гранью.** Рассмотрим прежде aberrации, вызванные непостоянством отклонения по поверхности дефлектора. На рис. 2, *a* наклонная прямая 1 показывает рабочую характеристику дефлектора вдоль некоторой окружности, т. е. величину угла отклонения падающего пучка света  $\alpha$  в зависимости от угловой координаты рассматриваемой точки на поверхности дефлектора  $\varphi$ . Пусть апертура сканируемого пучка света занимает дугу этой окружности от  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$  (см. рис. 1, *a*). Из рис. 1, *a* видно, что все точки падающего волнового фронта получают различное отклонение, после чего он искажается. Для восстановления волнового фронта установим на пути падающего или отклоненного пучка корректор в виде центрального участка совершенно тождественного отклоняющего элемента, но имеющего противоположное направление отклонения. Рабочую характеристику корректора показывает наклонная прямая 2. Суммарная характеристика (прямая 3) параллельна оси абсцисс, т. е. все точки волнового фронта вдоль данной окружности будут иметь одинаковый угол отклонения. Легко понять, что волновой фронт будет скорректирован вдоль любой окружности дефлектора, при любом его повороте и для любой ориентации ступеней. Такая простая коррекция обусловлена тем, что рабочая характеристика дефлектора линейна. При любой нелинейной рабочей характеристике дефлек-

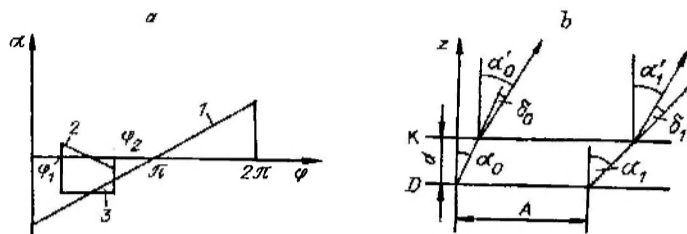


Рис. 2

тора осуществить ее коррекцию таким простым способом невозможно. Найдем точность корректировки волнового фронта вышеописанным способом, например, для дискового дефлектора. На рис. 2, *b* показаны круговое сечение некоторого участка рабочей поверхности дефлектора *D* и падающий на него световой пучок шириной *A*. На расстоянии *d* от дефлектора установлен корректор *K*. Рабочую характеристику дефлектора на этом сечении можно описать функцией

$$\alpha_D = \alpha_0 + \frac{\alpha_m}{2\pi R} x, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  — угол отклонения на левой границе дефлектора;  $\alpha_m$  — полный угол сканирования;  $R$  — радиус рассматриваемого сечения;  $x$  — линейная координата по дуге сечения.

Аналогичная функция корректора

$$\delta_K = \frac{\alpha_m}{2\pi R} \left( \frac{A}{2} - x \right). \quad (2)$$

Легко видеть, что неточность корректировки обусловлена тем, что после дефлектора световые лучи распространяются с разными углами к нормали (ось *z*) и падают на точки корректора, имеющие несколько иное отклонение, чем это необходимо для точной корректировки. Определим точность корректировки как относительную разность углов отклонения на границах светового пучка. Тогда, используя геометрические соотношения, можно получить

$$\frac{\alpha'_0 - \alpha'_1}{\alpha_m} = \frac{d}{2\pi R} \sin \left( \alpha_0 - \frac{\alpha_m A}{4\pi R} \right). \quad (3)$$

Поскольку расстояние между корректором и дефлектором может быть достаточно малым, то точность восстановления волнового фронта может быть высокой. Легко показать, что точность корректировки для цилиндрического дефлектора описывается аналогичным выражением, в котором  $R$  является радиусом цилиндра.

Аберрации круговой симметрии дискового дефлектора с концентрическими ступенями поясняет рис. 3. Показанные на этом рисунке отклоненные лучи  $k_1, k_2$  и  $k_3$  лежат в радиальных плоскостях  $S_1, S_2$  и  $S_3$ , перпендикулярных поверхности дефлектора. Поскольку эти плоскости не параллельны друг другу, то все лучи из рассматриваемого сечения  $AB$  имеют отличающиеся углы распространения как в направлении сканирования по координате  $x$ , так и в тангенциальном направлении по координате  $y$ . Разложив векторы  $k_1, k_2$  и  $k_3$  по осям координат, можно получить

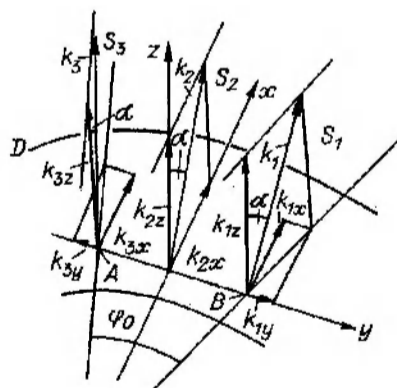


Рис. 3

величину угловой расходимости отклоненного светового пучка в направлении сканирования  $\theta_x$  и в тангенциальном направлении  $\theta_y$ :

$$\operatorname{tg}\theta_x/2 = \operatorname{tg}\alpha(1 - \cos\varphi_0/2), \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\theta_y/2 = \operatorname{tg}\alpha \cdot \sin\varphi_0/2, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — угол отклонения;  $\varphi_0$  — угловая апертура светового пучка относительно центра дефлектора.

Сравнивая (4) и (5), видим, что при малой апертуре светового пучка его угловая расходимость в тангенциальном направлении  $\theta_y \sim \varphi_0/2$  и существенно больше расходимости в направлении сканирования, которая пропорциональна  $\varphi_0^2/4$ .

Для дискового дефлектора с радиальными ступенями можно получить совершенно аналогичные выражения.

В случае цилиндрического дефлектора aberrации связаны с тем, что входные грани ступеней призм на разных участках апертуры сканируемого пучка не параллельны и ориентированы под разными углами к отклоняемым лучам. Возникающие при этом aberrации существенно меньше aberrаций дисковых дефлекторов, и рассматривать их количественно мы не будем.

Описанные выше aberrации круговой симметрии зависят от угла отклонения светового пучка, и поэтому устранить их для любого угла поворота дефлектора с помощью одного неподвижного элемента невозможно. Для этого необходимо использовать вращающийся корректирующий элемент, причем его ось вращения может не совпадать с осью вращения дефлектора.

Дефлекторы оптической кадровой развертки объемного телевидения. Рассмотрим теперь возможность создания дефлекторов оптической кадровой развертки объемного телевидения. К упомянутым во введении оптическим характеристикам развертки (апертура порядка 20—40 см и полный угол сканирования  $> 30^\circ$ ) следует добавить ее временные параметры, обеспечивающие совместимость объемного ТВ с обычным, а именно: частоту развертки  $f_p = 50$  Гц и отношение времени обратного хода  $T_{\text{обр}}$  к периоду развертки  $T$  или коэффициент «пилообразности» развертки  $\sim 0,1$ . Последний параметр существенно влияет на габариты дефлектора, и поэтому рассмотрим его в первую очередь. Для оптической развертки время обратного хода можно определить как время прохождения через апертуру сканируемого пучка поверхности дефлектора, на которой угол отклонения испытывает разрыв или скачок. Тогда коэффициент пилообразности можно записать в виде

$$\frac{T_{\text{обр}}}{T} = \frac{A}{2\pi R}, \quad (6)$$

где  $A$  — апертура сканируемого пучка в тангенциальном направлении;  $R$  — средний радиус дефлектора. Для апертуры сканируемого пучка  $A = 20$  см и коэффициента пилообразности 0,1 получаем из (6) средний радиус дефлектора  $R = 32$  см. В случае дискового дефлектора его внешний диаметр будет 84 см. Несмотря на такой большой диаметр, дефлектор может быть изготовлен достаточно легким. Цилиндрический дефлектор по сравнению с дисковым более провоздкий, но имеет свои достоинства: меньший размер aberrаций и возможность получения более широкого окна наблюдения по одной из координат без увеличения диаметра дефлектора. К недостаткам цилиндрических дефлекторов можно отнести то, что угловая частота их вращения ограничена прочностью используемых материалов. Так, согласно [12], для цилиндрического дефлектора произведение его радиуса на угловую скорость вращения  $\omega$  есть константа, зависящая от свойств материала

$$R\omega = \frac{\pi}{2} \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  — модуль упругости;  $\rho$  — плотность материала. Для плавленого кварца  $\sigma = 1,1 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ ,  $\rho = 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $R\omega = 113 \text{ м/с}$ . При частоте вращения  $f_p = 50 \text{ Гц}$  максимальный радиус дефлектора  $R = 35 \text{ см}$ . Таким образом, для создания дефлекторов, имеющих большой радиус, необходимы более прочные оптические материалы или нужно принимать специальные меры для упрочнения обычных материалов, например, их армирование. Такая армировочная сеть при вращении дефлектора будет незаметна наблюдателю и скажется только на яркости изображения.

Может показаться, что дисковые дефлекторы имеют недопустимо большие aberrации круговой симметрии. Однако поскольку в рассматриваемых применениях изображение, создаваемое с помощью этих дефлекторов, предназначено для наблюдения человеком, то ввиду малости зрачка глаза по сравнению с апертурой отклоняемого пучка эти aberrации практически не скажутся на разрешении в изображении, но при изменении точки наблюдения изображение может слегка деформироваться и смещаться в пространстве.

Суммируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что предложенные дефлекторы имеют два несомненных достоинства: минимальные размеры при большой апертуре сканируемого пучка и высокую линейность и пилообразность рабочей характеристики. Эти достоинства обусловлены тем, что дефлекторы выполнены в виде единственной замкнутой в кольцо отклоняющей «границы». Кроме того, рассматриваемые дефлекторы базируются на хорошо развитой технике вращающихся элементов, что, возможно, позволит в ближайшее время создать дефлекторы оптической кадровой развертки для объемного телевидения. В следующем разделе будут кратко рассмотрены некоторые возможные варианты использования данных дефлекторов в объемном телевидении.

Перспективы применения широкоапертурных дефлекторов в оптической развертке 3D ТВ. Из работ [1—5] следует, что оптические схемы 3D-видеокамеры и 3D-монитора практически тождественны. Поэтому мы ограничимся примерами применения предложенных выше дефлекторов, главным образом, в 3D-мониторах, требующих использования дефлекторов с большими апертурами, чем 3D-видеокамеры.

Как ясно из предыдущего раздела, на практике наиболее легко реализуется дисковый дефлектор. В случае горизонтальной оси вращения его применение в 3D-мониторе, как это описано, например, в [2], не требует дополнительных комментариев. В случае же вертикальной оси вращения появляется возможность создания нескольких зон наблюдения или даже панорамного изображения. Это иллюстрирует рис. 4, а, где показан дисковый дефлектор с концентрическими ступенями, по окружности которого располагаются оптические схемы ряда мониторов (на рисунке показаны всего два монитора).

Для лучшего понимания дальнейшего напомним кратко принцип создания объемного изображения в рассматриваемом методе 3D ТВ. За время развертки дефлектора на светоизлучающей матрице СМ, высвечивают ряд горизонтальных сечений сцены. Дефлектор развертывает эти сечения в пространстве и

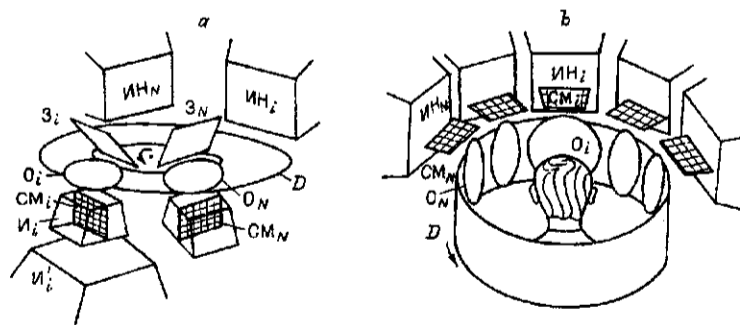


Рис. 4

создает первичное изображение сцены  $I_1$  в уменьшенном масштабе, в котором сечения ориентированы вертикально. Объектив  $O_1$ , который может быть выполнен совместно с корректором в виде некоторого элемента Френеля, создает далее мнимое изображение сцены  $I_1'$  в реальном масштабе, в котором сечения сцены ориентированы также вертикально. Зеркало  $Z_1$ , установленное под углом  $45^\circ$  к поверхности дефлектора, поворачивает это изображение на  $90^\circ$  в пространстве и создает изображение (рассматриваемое наблюдателем  $ИН_1$ ), в котором сечения ориентированы горизонтально. Аналогично работают и другие мониторы. При этом необходимо учитывать, что развертки всех мониторов сдвинуты во времени друг относительно друга. В зависимости от того, какие сигналы поступают на входы светоизлучающих матриц: от одной 3D-видеокамеры или от разных, один и тот же монитор может создавать или несколько зон наблюдения, или квазипанорамное изображение, для рассматривания которого необходимо перемещаться вокруг монитора.

Ширина полосы канала для передачи панорамного кругового изображения должна быть увеличена в число раз, равное числу светоизлучающих матриц. Полагая угловые размеры изображения, создаваемого одной светоизлучающей матрицей, равными  $36^\circ$ , получаем, что для передачи круговой панорамы ширина полосы канала должна быть увеличена на порядок. Волоконно-оптические линии связи вполне могут обеспечить такую полосу.

Весьма перспективен для 3D-мониторов и цилиндрический дефлектор, имеющий существенно меньшие aberrации. Например, привлекательно выглядит монитор на основе цилиндрического дефлектора с горизонтальной осью вращения (при этом светоизлучающая матрица находится внутри цилиндра). Достоинства этого монитора — компактность и широкая зона наблюдения изображения по горизонтали.

Цилиндрический дефлектор больших размеров с вертикальной осью вращения, внутри которого размещено несколько горизонтально расположенных светоизлучающих матриц, может использоваться и по схеме, показанной на рис. 4, а, для создания монитора с несколькими зонами наблюдения или с квазипанорамным изображением. Монитор, изображенный на рис. 4, б, позволяет воспроизводить истинное панорамное или круговое изображение. В этом мониторе светоизлучающие матрицы, воспроизводящие сечения сцены, размещены снаружи цилиндрического дефлектора с вертикальной осью вращения, а наблюдатель рассматривает изображение изнутри цилиндра. Наблюдатель будет ощущать себя так, как если бы он путешествовал в реальном пространстве, находясь под неким куполом с круговым обзором, причем траектория движения этого купола воспроизводит траекторию перемещения 3D-видеокамеры при съемке сюжета. Можно допустить, что дефлектор с диаметром цилиндра порядка метра будет вполне достаточен для создания удовлетворительной зоны наблюдения для 3-4 человек.

Подобное истинно панорамное изображение можно получить и в 3D-мониторе с дисковым дефлектором (см. рис. 4, а), расположив светоизлучающие матрицы над дефлектором, а зеркала под ним и развернув их так, что они отражают световой поток от СМ к оптической оси дефлектора, где находится зона наблюдения. Диаметр зоны наблюдения такого монитора будет приблизительно равен внутреннему диаметру рабочей поверхности дефлектора.

Несмотря на то что этот проект создания панорамного и кругового изображений на первый взгляд кажется фантастическим, он вполне реален.

**Заключение.** В настоящей статье для реализации большеапертурного дефлектора оптической кадровой развертки объемного телевидения предполагается использовать дефлекторы с одной кольцевой отклоняющей гранью, выполненной на основе призм Френеля. Благодаря такой конструкции эти дефлекторы имеют минимальные габариты при большой апертуре отклоняемого пучка и высокую пилообразность рабочей характеристики. Предлагаемые дефлекторы базируются на хорошо развитой технике вращающихся элементов и могут быть созданы в ближайшее время. Кроме того, эти дефлекторы дают возможность создать в перспективе 3D-мониторы с панорамным и круговым изображениями. Рассмотрены два варианта таких мониторов. Хотя

зона наблюдения кругового изображения в этих мониторах невелика, они имеют следующие преимущества перед проекционными мониторами, создающими «большую» круговую панораму: во-первых, в них можно восстанав-

1. Якимович А. П. // Техника кино и телевидения. 1978. № 4.
2. Васильев Н. А., Компанец И. Н., Якимович А. П. // Радиотехника. 1991. № 9.
3. Якимович А. П. // Автометрия. 1993. № 4.
4. Kompants I. N., Yakimovich A. P. // SPIE. 1993. 2068. P. 274.
5. Компанец И. Н., Якимович А. П. // Радиотехника. 1994. № 1.
6. Beiser L. // Laser Scanning Systems. Laser Application. N. Y.: Academic Press, 1974.
7. Zook I. D. // Appl. Opt. 1974. 13, N 4. P. 875.
8. Рошкован Г. Л. // Техника кино и телевидения. 1978. № 10.
9. Ребрин Ю. К., Сидоров В. И. // Оптические дефлекторы. Киев: Техника, 1988.
10. Tanquary A. R. et al. // Opt. Eng. 1983. 22, N 6. P. 687.
11. Tangonau G. L. // Electron. Lett. 1985. 21, N 16. P. 701.
12. Pole R. V., Werlich H. W., Krusche R. I. // Appl. Opt. 1978. N 20. P. 3294.
13. Gerbig V. // Opt. Commun. 1981. 36, N 2. P. 90.

*Поступила в редакцию 7 декабря 1994 г.*

---

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!