

УДК 621.397.13

А. П. Якимович

(Москва)

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ АКТИВНОЙ
И ПАССИВНОЙ ТРЕХМЕРНЫХ ВИДЕОКАМЕР,
ВОСПРИНИМАЮЩИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ СЦЕНЫ**

Проводится сравнение пространственного разрешения активной и пассивной трехмерных видеокамер. В первой из них зондирующее излучение освещает тонкий горизонтальный слой сцены, и затем его изображение воспринимается фотоматрицей. Пассивная 3D-видеокамера работает при естественном освещении, а для получения сечений сцены использует две параллельные щели, через которые проецирующий объектив «видит» только тонкий слой сцены. Показано, что обе видеокамеры при реализации на эквивалентных оптических элементах имеют практически равное пространственное разрешение и позволяют воспринимать одинаковое количество горизонтальных сечений сцены. Рассмотренные видеокамеры предназначены для работы в системах объемного телевидения и трехмерного зрения роботов.

Введение. Как один из путей создания объемного телевидения в [1—3] рассматривается метод сканирования сцены горизонтальными сечениями, заключающийся в восприятии, передаче и восстановлении для наблюдателя изображения ряда горизонтальных сечений сцены. В этих работах активная трехмерная (3D) видеокамера освещает реальную сцену широким и плоским зондирующим лучом и затем воспринимает освещенное сечение фотоматрицей. В отличие от известных триангуляционных методов создания трехмерного зрения роботов [4, 5], в которых фотоматрица расположена нормально оптической оси проецирующего объектива, в этой 3D-видеокамере фотоматрица ориентирована вдоль оптической оси объектива в плоскости фокусировки изображения сечения, что существенно повышает пространственное разрешение видеокамеры.

В настоящей работе для восприятия горизонтальных сечений сцены предлагается пассивная 3D-видеокамера, работающая при естественном освещении сцены. В этой видеокамере перед проецирующим объективом установлены две узкие параллельные горизонтальные щели, через которые видеокамера «видит» только узкий слой или сечение сцены. С целью выяснения преимуществ и недостатков активной и пассивной 3D-видеокамер далее будет рассмотрено трехмерное пространственное разрешение этих видеокамер.

Пространственное разрешение активной 3D-видеокамеры. На рис. 1 показана оптическая схема активной 3D-видеокамеры. Зондирующий луч (ЗЛ) лазера поступает в оптическую схему дефлектора (D_1), где из него формируется широкий и плоский луч с выходной толщиной по вертикали d_0 , который освещает тонкий слой сцены S_0 , параллельный оптической оси объектива L . Объектив L проецирует изображение освещенного сечения на фотоматрицу (ФМ), расположенную параллельно оптической оси объектива. Рабочая входная апертура объектива с размерами A_v и A_r по вертикали и горизонтали соответственно находится выше его оптической оси (см. рис. 1), так что на

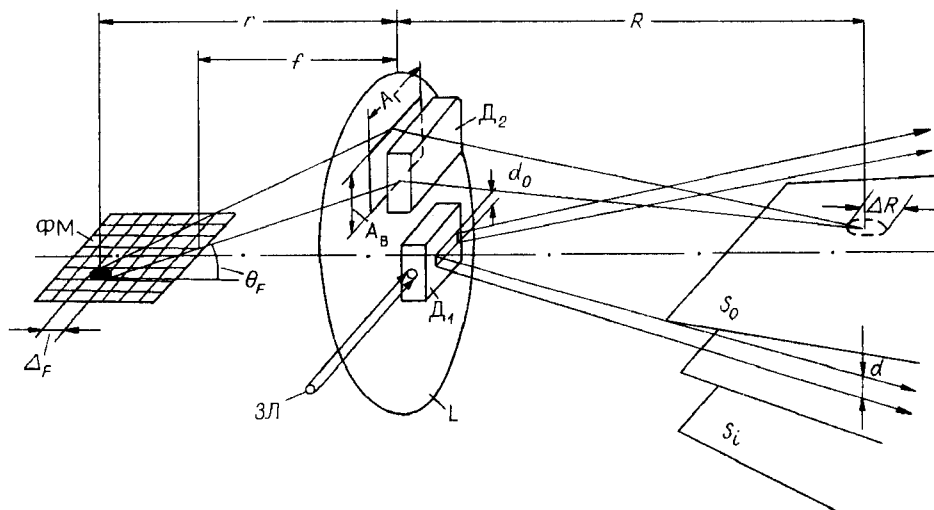


Рис. 1

фотоматрицу падает наклонный пучок света под углом θ_F к поверхности фотоматрицы. Дефлектор D_1 , отклоняя зондирующий луч в вертикальном направлении, освещает последовательно ряд горизонтальных сечений сцены S_i . При этом D_2 отклоняет световой пучок от сечений S_i на такой же угол в обратном направлении, и поэтому изображение освещенного сечения сцены всегда фокусируется на поверхность фотоматрицы.

Разумеется, может использоваться и другая геометрия оптической схемы 3D-видеокамеры. Например, D_1 может быть расположен на некотором расстоянии от оптической оси объектива, а рабочая апертура объектива находится на его оптической оси. В этом случае плоскость фокусировки сечений сцены S_i и поверхность фотоматрицы будут ориентированы наклонно к оптической оси объектива.

Найдем трехмерное разрешение вышеописанной 3D-видеокамеры в пространстве сцены, т. е. размер элементов разрешения по горизонтали и дальности в плоскости освещенного сечения S_0 , а также разрешение видеокамеры по вертикали, которое определяет число воспринимаемых сечений. В своем рассмотрении мы будем учитывать только принципиальные ограничения, накладываемые на величину разрешения оптической схемой видеокамеры, полагая, что фотоматрица имеет достаточно высокое разрешение. Так как рабочую апертуру объектива можно представить как эквивалентную линзу и призму с углом отклонения по вертикали θ_F , то угловое разрешение видеокамеры по горизонтали δ_r можно получить из известного выражения

$$\delta_r = \frac{\lambda}{A_r}, \quad (1)$$

где A_r — рабочая апертура объектива по горизонтали; λ — длина волны зондирующего излучения.

Разрешение видеокамеры по дальности определяется продольным размером пятна рассеяния Δ_F точек изображения на фотоматрице, которое равно

$$\Delta_F = \frac{\lambda r}{A_r \sin \theta_F}, \quad (2)$$

где r — расстояние от объектива до рассматриваемой точки изображения.

Используя формулу линзы и (2), получаем размер разрешения по дальности ΔR в пространстве сцены:

$$\Delta R = \frac{\lambda R(R-f)}{A_b f \sin \theta_f} \approx \frac{\lambda R^2}{A_b f \sin \theta_f}, \quad (3)$$

где f — фокусное расстояние объектива; R — расстояние от объектива до рассматриваемого плана дальности в пространстве сцены.

Разрешение 3D-видеокамеры по вертикали определяется толщиной зондирующего луча d в пространстве сцены, которую для случая однородного по сечению зондирующего луча можно описать выражением [6]

$$d = d_0 + 2 \frac{\lambda R}{d_0}, \quad (4)$$

где d_0 — начальная толщина зондирующего луча.

Используя (4), получаем угловое разрешение видеокамеры по вертикали δ_b в зависимости от расстояния R до регистрируемых объектов сцены:

$$\delta_b = \frac{d}{R} = \frac{2\lambda}{d_0} + \frac{d_0}{R}. \quad (5)$$

На рис. 2 эта зависимость показана графически при значении $\lambda = 0,5$ мкм, и для различной величины начальной толщины зондирующего луча $d_0 = 0,75; 1; 2; 4$ мм — соответственно кривые 1—4. Как видно из рис. 2 и (5), при малой начальной толщине зондирующего луча получаем хорошее разрешение для близких объектов, но большую дифракционную расходимость зондирующего луча и низкое разрешение для удаленных объектов, а при большой начальной толщине зондирующего луча — низкое разрешение для близких объектов, но малую расходимость зондирующего луча и высокое разрешение для удаленных объектов. Для объемного телевидения оптимальная начальная толщина зондирующего луча находится в диапазоне $\sim 0,75 \div 1$ мм, при ней мы имеем разрешение по вертикали для близких объектов порядка $2 \cdot 10^{-3}$ рад, а для удаленных — 10^{-3} рад. Для угловых размеров сцены по вертикали $45^\circ \approx 0,8$ рад это дает 400—800 элементов разрешения по вертикали, что соответствует телевизионному стандарту.

Пространственное разрешение пассивной 3D-видеокамеры. На рис. 3 показана оптическая схема пассивной 3D-видеокамеры. Две горизонтальные параллельные щели A_1 и A_2 шириной d_1 и d_2 соответственно установлены перед объективом L_1 на расстоянии l друг от друга. Щели ограничивают поле зрения объектива таким образом, что из его апертуры виден только узкий слой сцены S_0 , параллельный оптической оси объектива. Объектив L_1 формирует изображение этого сечения в некоторой плоскости S_n , также параллельной оптической оси объектива. Световые лучи, создающие это изображение, распространяются параллельно его плоскости S_n , и изображение невозможно воспринять реальной фотоматрицей. Для восприятия такого изображения фотоматрица наклоняется под углом θ_f к плоскости распространения сигнального пучка, а за объективом устанавливается цилиндрическая рассеивающая линза L_2 . Эта

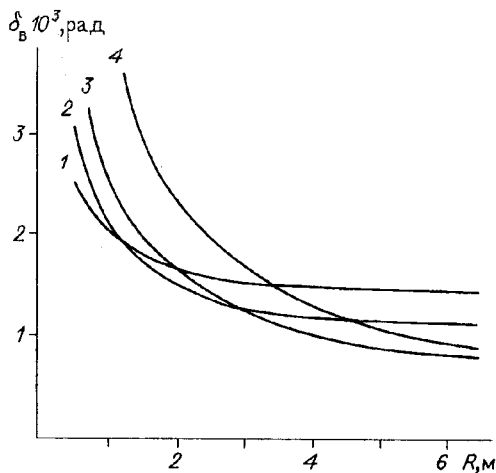


Рис. 2

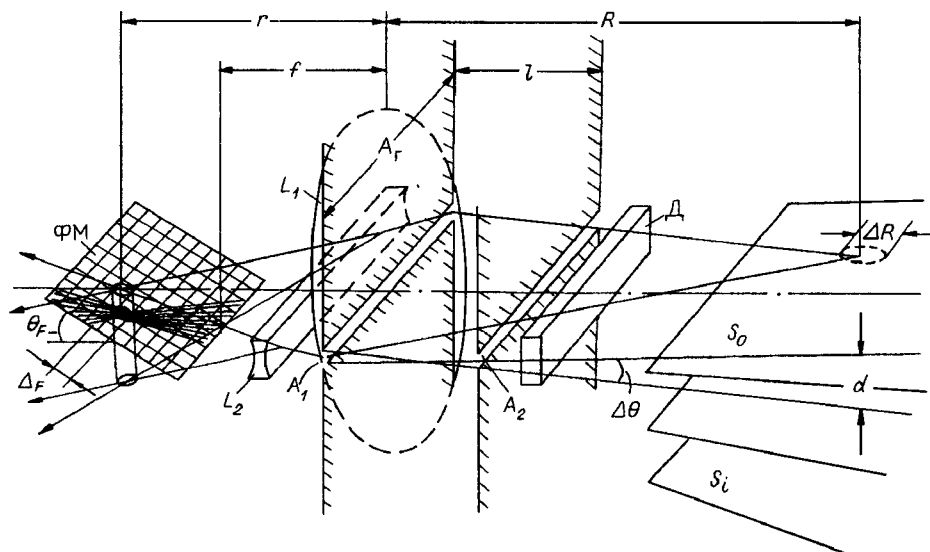


Рис. 3

линза расширяет каждую точку изображения в вертикальном направлении, т. е. преобразует их в некоторые вертикальные столбики. При этом фотоматрица воспринимает точки пересечения этих столбиков со своей светочувствительной поверхностью.

Более точно, пассивная 3D-видеокамера воспринимает не чистое изображение сечения сцены, а его свертку с некоторой функцией рассеяния точки. Эта функция рассеяния может быть упрощенно (в приближении геометрической оптики) представлена в виде двух секторов, образованных двумя параллельными прямыми линиями, которые исходят из горизонтальных границ апертуры объектива L_1 и проходят через данную точку изображения (см. рис. 3). Распределение интенсивности внутри этих угловых секторов обратно пропорционально расстоянию до центра функции рассеяния. Для получения истинного изображения сечения необходима дополнительная обработка считанной с фотоматрицы информации. Эту обработку существенно упрощает тот факт, что ввиду непрозрачности реальных объектов на каждом луче зрения видеокамеры (центральном луче объектива L_1), а следовательно, и на каждом столбце фотоматрицы, соответствующем данному лучу зрения, находится только одна точка изображения.

При работе 3D-видеокамеры дефлектор последовательно проецирует на фотоматрицу ряд сечений сцены S_i , которые воспринимаются аналогичным образом.

Рассмотрим пространственное разрешение пассивной видеокамеры. Легко видеть, что ее угловое разрешение по горизонтали определяется шириной перетяжки пятна рассеяния, т. е. описывается выражением (1), в котором A_r представляет собой размер рабочей апертуры объектива L_1 по горизонтали. Разрешение по дальности определяется длиной перетяжки пятна рассеяния, которая, согласно [6], равна

$$\Delta_F = \frac{\lambda r^2}{A_r^2}, \quad (6)$$

где r — расстояние от объектива до центра перетяжки.

Преобразуя эту величину с помощью формулы линзы в пространство сцены, получаем разрешение по дальности

$$\Delta R = \frac{\lambda R^2}{A_r^2}. \quad (7)$$

Сравнивая (7) с (3), видим, что при равных величинах вертикальной апертуры активной видеокамеры и горизонтальной апертуры пассивной видеокамеры их разрешение по дальности практически одинаково. Однако поскольку в активной видеокамере рабочая апертура смещена от центра объектива, для нее необходим объектив или линза несколько больших размеров.

Согласно [7], стереоскопическая острота зрения человека, или его разрешение по дальности ΔR , описывается выражением, аналогичным (7), в котором коэффициент λ/A_r^2 заменен на γ/B , где $B = 60$ мм — размер глазного базиса; γ — константа, зависящая от наблюдателя и равная $1,5 \div 10''$. Используя эти данные и (7), можно получить, что для объемного телевидения, удовлетворяющего потребности среднего наблюдателя по числу элементов разрешения или планов дальности, необходима апертура 3D-видеокамеры ~ 35 мм, а для наблюдателя с «острым» зрением ~ 60 мм — порядка размеров глазного базиса человека.

Количество сечений, воспринимаемых пассивной 3D-видеокамерой, или ее разрешение по вертикали, определяется начальной толщиной и угловой расходимостью фиксируемых слоев. В приближении геометрической оптики их угловую расходимость $\Delta\theta$ можно определить следующим образом:

$$\Delta\theta = \frac{d_r + d_r}{l}, \quad (8)$$

где $d_{1,2}$ — ширина щелей; l — расстояние между ними.

В этом случае толщина регистрируемого слоя сцены d в зависимости от расстояния R до объектов сцены будет равна

$$d = d_1 + R \sin \Delta\theta \approx d_1 + \frac{R(d_1 + d_2)}{l}. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) справедливы, если можно пренебречь дифракционным расширением сигнального пучка после прохождения им первой щели. Это выполняется при

$$d_1^2 > \lambda l. \quad (10)$$

Вследствие виньетирования эффективная входная апертура видеокамеры зависит от вертикальной координаты воспринимаемых точек объектов и описывается сверткой апертурных функций щелей. Для двух щелей равной ширины входная апертурная функция имеет вид треугольной функции, и для определения толщины фиксируемого слоя в этом случае целесообразно использовать его полуширину. Полагая, что щели имеют равную толщину d_0 , удовлетворяющую условию (10), получаем угловое разрешение пассивной 3D-видеокамеры:

$$\delta_v = \frac{d_0}{l} + \frac{d_0}{R}. \quad (11)$$

На рис. 4 показано графически угловое разрешение по вертикали δ_v в зависимости от расстояния R до объектов сцены для различных значений расстояния между щелями l и при выполнении условия (10): кривая 1 — $l = 100$ мм, $d_0 = 0,25$ мм;

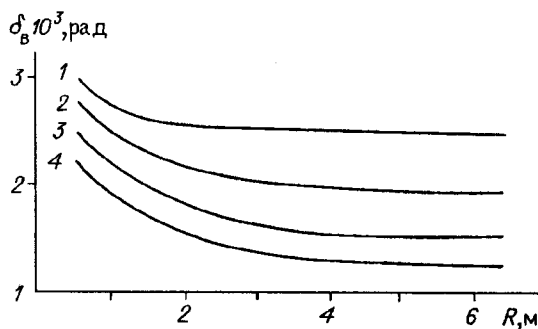


Рис. 4

кривая 2 — $l = 200$ мм, $d_0 = 0,35$ мм; кривая 3 — $l = 300$ мм, $d_0 = 0,45$ мм; кривая 4 — $l = 400$ мм, $d_0 = 0,5$ мм. Как видно из графиков, разрешение видеокамеры повышается с увеличением расстояния между щелями. При $l = 400$ мм угловое разрешение видеокамеры для близких объектов ($R \sim 1$ м) порядка $2 \cdot 10^{-3}$ рад и для удаленных — $\sim 10^{-3}$ рад. При угловых размерах сцены $45^\circ \approx 0,8$ рад это дает $400 \div 800$ горизонтальных сечений сцены, чего вполне достаточно для практики.

Сравнивая рис. 2 и 4, видим, что по пространственному разрешению и количеству воспринимаемых сечений ни активная, ни пассивная видеокамеры не имеют явного преимущества одна перед другой. Это объясняется тем, что в обоих случаях разрешение по вертикали ограничено дифракционными эффектами: дифракционной расходимостью зондирующего луча в одном случае и дифракцией сигнального пучка на щелях — в другом.

Заключение. В настоящей работе проведено сравнение активной и пассивной 3D-видеокамер по размеру трехмерного пространственного разрешения. Как было выяснено, обе видеокамеры при реализации на эквивалентных оптических элементах имеют практически одинаковое пространственное разрешение.

Несомненно, что пассивная видеокамера, которая не требует зондирующего излучения, имеет более широкие перспективы практического использования. Однако за это преимущество приходится расплачиваться меньшей световой эффективностью, более низким контрастом изображения на фотоматрице и необходимостью дополнительной обработки считанной с нее информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Н. А., Компанец И. Н., Якимович А. П. // Радиотехника. 1991. № 9.
2. Kompanets I. N., Yakimovich A. P. // SPIE. 1993. 2065. P. 274.
3. Якимович А. П. Способ передачи и восстановления широкоапертурных объемных изображений в методах зондирования сцены // Автометрия. 1993. № 4.
4. Besl P. J. // Adaptive Optical Range Imaging Sensors, Advances in Machine Vision, N. Y., 1989.
5. Klicker J., Klein-Gannewigk P. // SPIE. 1993. 2065. P. 219.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1977.
7. Валюс Н. А. Стереодиагностика, стереокино, стереотелевидение. М.: Искусство, 1986.

Поступила в редакцию 7 декабря 1994 г.