

ФАСЕТОЧНОЕ ЗРЕНИЕ:

ПЕРСПЕКТИВЫ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

В природе кроме глаза, строящего изображение через один единственный входной зрачок, существует и другой тип глаз – фасеточный, состоящий из множества микрообъективов. Природа всегда рациональна. В чем же рациональность фасеточного глаза, можно ли ее использовать в оптико-электронных системах и как? Стоит ли вообще думать об этом, ведь реализация в технике многих природных моделей оказалась невозможной? Эти вопросы обсуждаются в статье.

ФАСЕТОЧНЫЙ ГЛАЗ

Фасеточные глаза – сложные глаза, основной парный орган зрения насекомых, ракообразных и некоторых других беспозвоночных. Они образованы особыми структурными единицами – омматидиями, роговичная линза которых имеет вид выпуклого шестигранника – фасетки. Фасеточные глаза насекомых неподвижны, расположены по бокам головы и могут занимать почти всю ее поверхность. Глаза различных видов насекомых состоят из большого числа омматидиев: у рабочего муравья – около 100, у комнатной мухи – около 4000, у рабочей пчелы – 5000, у бабочек – до 17000, у стрекоз – до 30000.

В зависимости от анатомических особенностей омматидиев и их оптических свойств различают 3 типа фасеточных глаз: аппозиционные, оптикосуперпозиционные и нейросуперпозиционные. В аппозиционных глазах смежные омматидии постоянно изолированы друг от друга непрозрачным пигментом, и рецепторы воспринимают излучение, направление которого совпадает с осью данного омматидия. С точки зрения технической реализации наиболее проста аппозиционная модель (рис.1а). Ее можно представить как сопряженные матрицы микролинз и фоторецепторов, воспринимающих поток излучения данного направления (рис.1б).

Каковы же достоинства фасеточных глаз, если рассматривать их применительно к функционированию оптико-элек-

тронных систем? Прежде всего, это большое угловое поле. Маленькие "глазки"-омматидии направлены во все стороны и могут охватывать огромное угловое поле вплоть до полнотной сферы. Фасеточный глаз способен быстро обнаруживать движение, поскольку его временная инерционность в 15 раз меньше, чем у глаза человека. Следует отметить также однородность чувствительности, большую глубину изображаемого пространства, стереоскопичность зрения, чувствительность к поляризации излучения и, наконец, поразительную миниатюрность фасеточных глаз.

Однако фасеточному глазу присуще низкое пространственное разрешение, которое следует из принципов пространственной дискретизации. В глазе человека, как и в системах с фокальными матрицами, дискретизация пространства, раз-

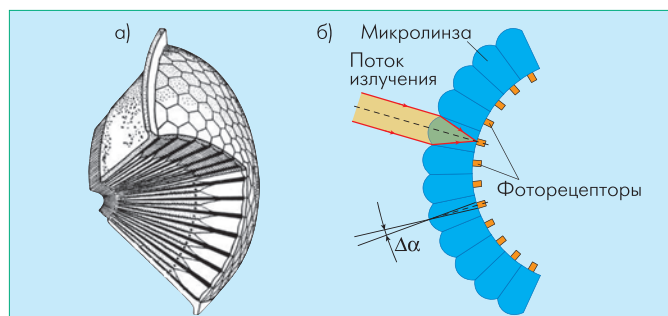


Рис.1 Фасеточный глаз: а) аппозиционный тип строения глаза насекомого, б) оптическая схема аппозиционной модели фасеточного зрения

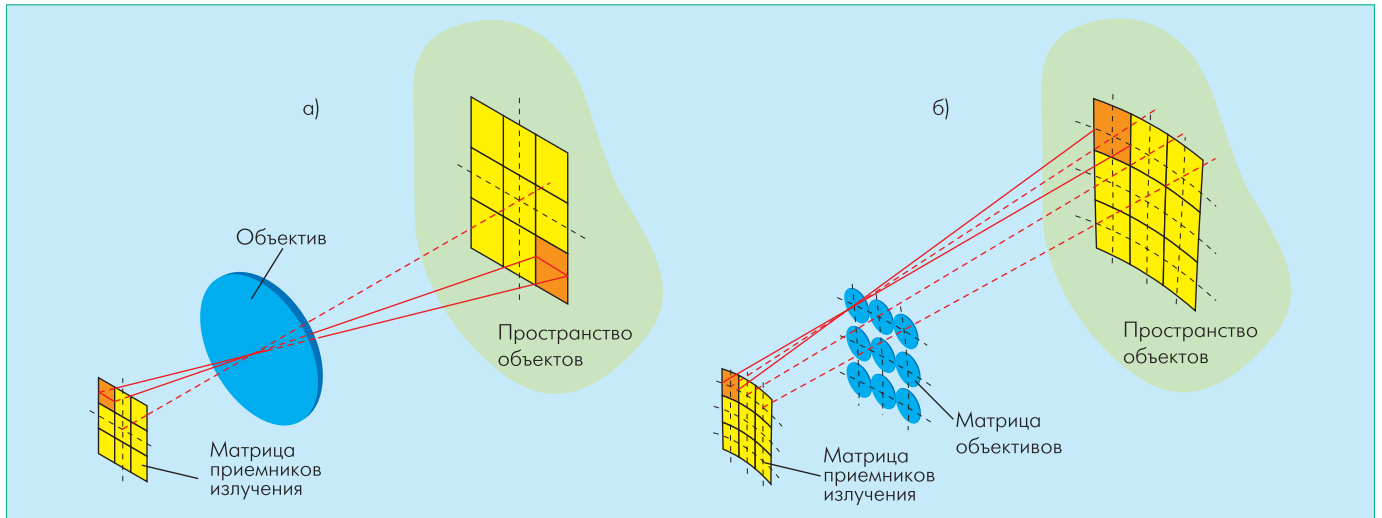


Рис.2 Схема процессов дискретизации в пространстве объектов (а) и в пространстве изображений (б)

деление его на пиксели происходит в области изображения (на пиксели делится полученное объективом изображение). В фасеточном глазе дискретизация осуществляется в пространстве объектов (каждый глаз, или микрообъектив, видит только "свою" область пространства). На рис.2 схематически показаны процессы дискретизации в пространстве объектов и в пространстве изображений. Очевидно, что при малых значениях фокусного расстояния микролинз пространственное разрешение, определяемое углом $\Delta\alpha$ (см.рис.1б), хуже, чем у длиннофокусных объективов.

Усилия разработчиков технических аналогов фасеточного глаза направлены на то, чтобы реализовать преимущества фасеточного зрения и при этом получить высокое пространственное разрешение.

МАКРОЛИНЗОВЫЕ СИСТЕМЫ

При решении ряда научных и практических задач (мониторинг, обнаружение объектов, целеуказание и др.) возникает необходимость обзора пространства в широкой кольцевой зоне (360° по азимуту, десятки градусов по углу места), в полусфере или даже в полной сфере. Обычные объективы (макроскопические системы), направленные в различные стороны, например выстроенные по окружности и перекрывающие таким образом своими угловыми полями кольцевую зону, – вполне подходящая идея для построения обзорно-панорамной оптико-электронной системы. Такие системы используются, например, для видеонаблюдения, обнаружения и локации импульсных целей. Отсутствие механического сканирования является в последнем случае решающим достоинством, к которому следует добавить возможность использования объективов с большими входными зрачками. Однако при внимательном рассмотрении возможностей таких систем выясняется, что число k оптических каналов должно составлять порядка десяти. При меньшем числе каналов,

допустим при $k = 6$, угловое поле в 60° могут обеспечить лишь достаточно сложные по конструкции объективы, при этом следует стремиться к увеличению размеров фокальных матриц. Наибольшие из известных сегодня матриц многоэлементных приемников излучения имеют формат порядка одного дюйма по диагонали. При угле поля $2\omega = 60^\circ$ фокусное расстояние объектива f' оказывается примерно равным диагонали матрицы, то есть дюйму, а диаметр входного зрачка – как минимум в два раза меньше.

Приближенная оценка диаметра D входного зрачка объектива определяется соотношением:

$$D = \left(\frac{D}{f'} \right) \frac{l}{2\omega} = \left(\frac{D}{f'} \right) \frac{\ln}{4\pi},$$

где l – линейное поле в фокальной плоскости объектива, соответствующее угловому полю 2ω , а отношение D к f' – относительное отверстие объектива.

Увеличение числа независимых оптических каналов порождает громоздкие конструкции, создает проблему стыковки большого числа угловых полей независимых каналов. Решение этой проблемы было найдено путем создания интегрированной конструкции обзорно-панорамной системы [1], которая по своей структуре и свойствам существенно ближе к фасеточным системам зрения (рис.3). Она содержит n штук секторных объективов, образующих кольцо. Пространство объектов делится секторами на n равных частей, и каждая соответствует азимутальному углу величиной $360^\circ/n$. Внешняя (входная) поверхность каждого сектора является светосильной, может быть сферической или асферической. Выходная поверхность (торец) – плоская. Изображение создается в плоскости торца, где может располагаться приемник излучения или оптическое волокно, подводящее поток излучения к приемнику излучения. При использовании одноэлементных приемников излучения такая система может применяться для

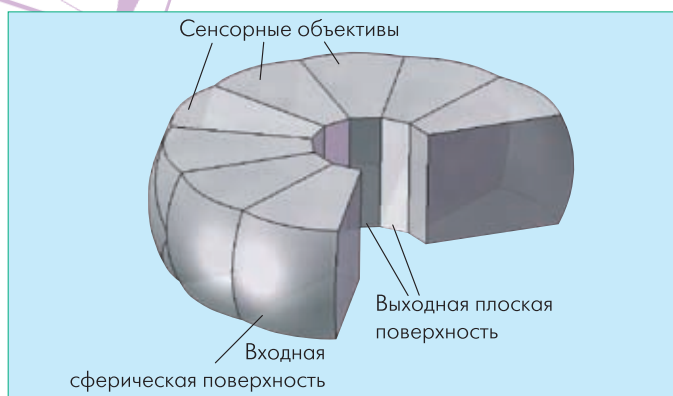


Рис.3 Схема устройства для измерения азимутальных углов импульсных целей

обнаружения движения, для обнаружения импульсных целей и измерения их азимутальных координат с погрешностью $3^{\circ}-5^{\circ}$. По углу места угловое поле может достигать $30^{\circ}-40^{\circ}$.

Достоинством панорамной системы с секторными объективами является не только сравнительная компактность конструкции. Использование одноэлементных приемников излучения позволяет более свободно варьировать спектральными диапазонами, обеспечить высокое быстродействие системы, низкий уровень внутренних шумов. Более того, боковые поверхности секторов, обработанные соответствующим образом, выполняют функции бленды, расположенной перед приемником излучения, который при этом работает "со дна колодца", когда боковые помехи подавляются блендой.

В конце 90-х годов концепция мозаичного построения углового поля систем военного назначения, служащих для поиска, слежения и распознавания угроз, была реализована в проекте IRST (Infrared Search and Track) [2]. В проекте, получившем название "Купол" ("The Cupola"), угловое поле перекрывается выстроенными по окружности девятью объективами, работающими в спектральном диапазоне 3–5 мкм, и девятью объективами, работающими в диапазоне 8–12 мкм (рис.4). Каждый отдельный объектив имеет угловое поле $20^{\circ} \times 20^{\circ}$ и сопряжен с фокальной матрицей многоэлементных приемников излучения. В каналах 3–5 мкм использованы матрицы 1024×1024 элементов, обеспечивающие пространственное разрешение 0,34 мрад. В каналах 8–12 мкм – матрицы с числом элементов 512×512 , дающие разрешение 0,62 мрад.

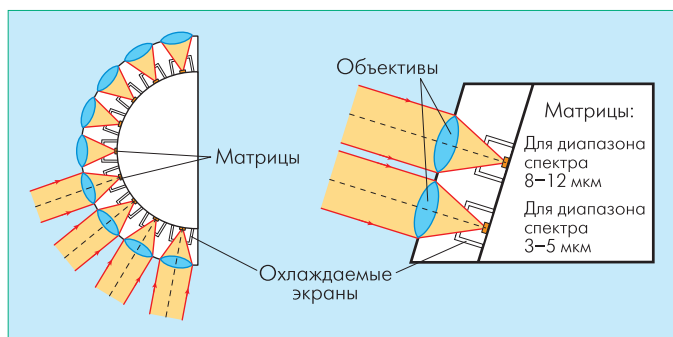


Рис.4 Мозаичное построение системы "Купол" для поиска, слежения и распознавания угроз

В последние годы появились сообщения [3] о разработках оптико-электронных систем высокого разрешения, в которых используется мозаичный (фасеточный) принцип построения углового поля с помощью макрообъективов с фокальными матрицами. В университете штата Алабама в Хантсвилле (США) под руководством Д.Поллока совместно с компанией Sony в 2007 году разработана широкоугольная камера, оптическая система которой состоит из 271 объектива, которые расположены через определенный угол и занимают в совокупности участок сферы (конструкция напоминает кухонный дуршлаг) (рис.5).

В фокальной плоскости такой многолинзовой системы располагаются матрицы приемников излучения, сопряженные с соответствующими объективами. Камера предназначена для спутникового наблюдения и аэровидеосъемки. Пространственное разрешение камеры измеряется в гигапикселах, частота обновления изображения – 4 кадра в секунду. При съемке с высоты 7,5 км охватывается площадь 10×10 км² при разрешении 0,5 м на пиксел. Это соответствует полю обзора примерно $76,5^{\circ}$ и угловому разрешению $13,3''$. На один канал приходится порядка 3,7 мегапикселов. Разработчики камеры предполагают, что она с успехом может использоваться для наблюдения за перемещением транспортных средств в пределах крупного города.

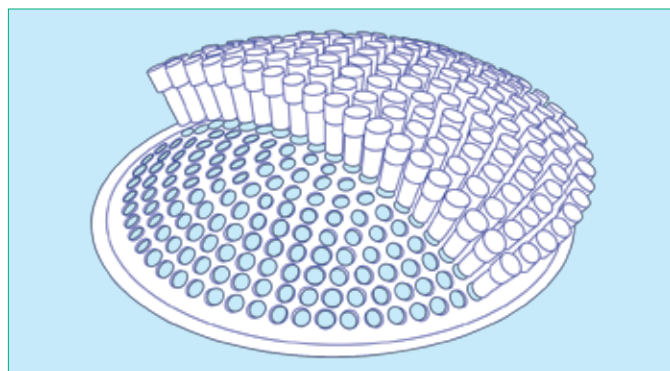


Рис.5 Сферическая конструкция камеры для спутникового наблюдения и аэровидеосъемки

Матричное построение углового поля, при котором объективы развернуты по отношению друг к другу на определенный угол, позволяет реализовать трехмерное "видение" пространства, поскольку каждый объект воспринимается объективом матрицы под своим углом. Корпорация Adobe разработала устройство, названное Magic Lens. В нем небольшие объективы расположены на поверхности шара диаметром порядка 15 см. Такое расположение позволяет делать снимки объектов с различных ракурсов и получить информацию о глубине изображаемого пространства [4].

МИКРОЛИНЗОВЫЕ СИСТЕМЫ

К микролинзовым оптическим системам не применимы обычные технологии изготовления макролинз, в которых каждая линза изготавливается индивидуально. И методы расчета

объективов, принятые в прикладной оптике, тоже не применимы к микролинзам. Но дело не только в этом. С точки зрения волновой оптики граница между макрооптическими и микрооптическими системами может быть демаркирована достаточно определенно. Будем уменьшать обычный объектив в масштабе, оставляя его относительное отверстие неизменным. Геометрические aberrации оптических пучков при этом несколько уменьшатся, но влияние дифракции при уменьшении входного зрачка будет сказываться все больше. Область микрооптики начинается там, где дифракционный кружок рассеяния становится больше aberrационного кружка. Угловой размер дифракционного кружка δ_y , определяемый по радиусу первого максимума, как известно, равен

$$\delta_y = \frac{1,22 \lambda}{D},$$

где λ – длина волны, D – диаметр апертуры. А максимальная пространственная частота f_m различных дифракционных максимумов в плоскости изображения с учетом f' – фокусного расстояния микролинзы будет определяться, как

$$f_m = \frac{D}{1,22 \lambda f'}$$

Интервал выборки Δx в соответствии с теоремой Котельникова должен быть

$$\Delta x \leq \frac{1}{2 f_m},$$

или

$$\Delta x \leq \frac{1,22 \lambda f'}{2D}$$

Тогда пространственное разрешение Δy , в угловой мере определяемое отношением Δx к f' , удовлетворяет неравенству

$$\frac{\Delta x}{f'} \leq \frac{1,22 \lambda}{2D}$$

Отсюда следует, что равенство $D \times \Delta y = 0,6\lambda$ можно принять граничным условием, разделяющим микро- и макрооптику. Величина $D \times \Delta y$ определяет близость линзы к дифракционному ограничению. Так, например, при $\lambda = 0,5$ мкм, разрешению $1'$ соответствует зрачок диаметром 1 мм.

Для определения числа пикселей в изображении, даваемом микролинзой, будем считать, что это изображение имеет форму квадрата, который вписывается в диаметр D апертуры линзы (рис.6). Площадь изображения равна $S = D^2/2$. Будем считать, что площадь дифракционного кружка равна площади квадрата со стороной

$$\delta_l = \frac{1,22 \lambda}{D} f'$$

Тогда число пикселей N , различных в изображении, будет равно

$$N = \frac{S}{\delta_l^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2$$

Отсюда следует, что одиночная миниатюрная линза дает небольшое число пикселей в изображении. Так, при

$D = 0,1$ мм, $\lambda = 0,5$ мкм $N = 133$, что примерно соответствует матрице 12×12 элементов. Ясно, что с таким "глазом" насекомое, например пчела, не может существовать. Поэтому природа пошла по пути формирования множества таких крошечных глаз, обеспечивающих выполнение таких важных жизненных функций, как ориентация в пространстве, поиск партнера, обнаружение движения и других.

В последние годы в ряде исследовательских лабораторий предприняты попытки технической реализации фасеточного зрения [5]. Они направлены на решение важной проблемы выбора взаимного размещения микролинзы и приемника. Дело в том, что для получения значительного поля обзора микролинзы и матрицы приемников излучения должны быть размещены на неплоской, например сферической, поверхности. В то же время хорошо разработанные полупроводниковые технологии и технологии изготовления микролинз приспособлены к плоским поверхностям.

Перспективный метод изготовления матриц микролинз, размещенных на сферической поверхности, предложен в Калифорнийском университете Беркли [6]. Микролинзы располагаются на купольной поверхности из эпоксидной смолы. Каждая микролинза сопряжена с оптическим волокном, подводящим поток излучения к приемнику излучения (рис.7).

Основным направлением разработок мозаичных микрооптических систем является миниатюризация технических устройств и получение объемных изображений. Миниатюрность мозаичных систем определяет перспективы их применения в мобильных фотокамерах. В Японии разработаны миниатюрные фасеточные линзы, позволяющие создать фотокамеры размером и толщиной не более 2 мм. [7]. Оснащение мобильных устройств, например телефонов, такими камерами выводит их на новый технологический уровень. В Фраунгоферовском институте прикладной оптики г.Иена (Германия) разработан прототип плоской цифровой фотокамеры толщиной менее 1 мм [8]. С помощью такой камеры можно, например, сделать пластиковую карту, которая будет узнавать хозяина в лицо.

Компактные мозаичные системы позволяют распознавать объекты, обнаруживать движение и поэтому могут использоваться для контроля ситуаций на дороге, в робототехнике. Ученые из Австралии разработали "микросамолет" весом в 75 граммов, который предназначен для исследования Марса. Летательный аппарат оснащен фасеточной камерой, позволяющей фиксировать распределение ультрафиолетового излучения, определять расстояние до деталей ландшафта, ориентироваться в пространстве. Масса микрооптической фасеточной камеры не превышает сотен миллиграмм [9].

С помощью микролинзовой мозаичной системы может быть получено и объемное изображение. В Стэнфордском университете (США) разработана камера, в которой используется 12616 микрообъективов, каждый из которых работает на участок в 256 пикселей трехмегапиксельной матрицы. Камера

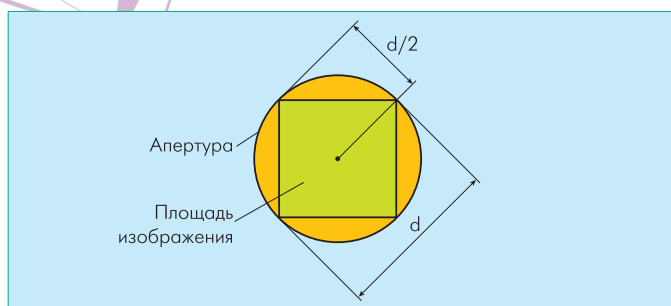


Рис.6 Изображение объекта, вписанное в апертуру линзы

может дополняться внешним макрообъективом, при котором каждая точка изображения, создаваемого макрообъективом, попадает минимум в четыре микрообъектива. При портретной съемке кроме объемной фотографии может быть получена информация о расстоянии до деталей лица, поэтому одно из применений камеры – распознавание лиц в системах обеспечения безопасности. Камера может использоваться для трехмерной печати, трехмерного моделирования зданий [10].

Природа дает нам замечательный пример построения зрительной системы в виде фасеточного глаза. Обладая значительно худшим пространственным разрешением, чем глаз человека, фасеточный глаз имеет ряд преимуществ, и в первую очередь – широкое поле обзора и малые габариты. Принцип устройства фасеточного глаза можно использовать для разработки интегрированных оптико-электронных систем с широким угловым полем, в том числе систем кругового обзора, и при этом добиться высокого пространственного разрешения, значительно более высокого, чем у фасеточного глаза.

В последние годы в прикладной оптике появилось направление по разработке искусственных аналогов фасеточных глаз. Это предвещает революцию в области разработки микроминиатюрных систем видеонаблюдения и контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соломатин В.А. и др. Устройство для определения азимута светозлучающих объектов. Авт. св. СССР № 4689468/ 22 от 05.05.89.
2. Visconti C., Landini S., Barani G. et al. EUCLID RTR 8.2 Software Simulator.– SPIE, 1998, v.3436.
3. <http://www.uah.edu/News/newsread.Php?newsID=1048>
4. http://soft.mail.ru/pressr_page.php?id=27017
5. Volkel R., Ossmann C., Scharf T. et al. Optical Microsystems for imaging.– SPIE, 1998. v.3410.
6. <http://www.membrana.ru/articles/technic/2005/11/18210000.html>
7. <http://www.technolocman.ru/more.html?di=2323>.
8. http://soft.mail.ru/pressr_page.php?id=28991.
9. <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1180015&s=260000086>
10. <http://www.secnews.ru/foreign/10759.htm>.

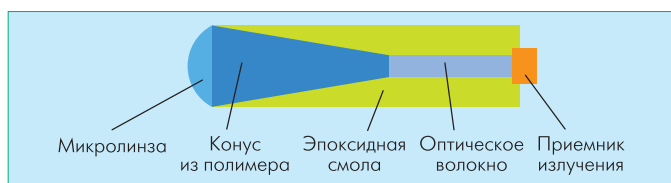


Рис.7 Схема сопряжения микролинзы с оптическим волокном