УДК 621.383.8

ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ПЕЛЕНГАТОР КРУГОВОГО ОБЗОРА

© 2005 г. **В. А. Ершов; А. В. Рублев; А. Н. Старченко**, канд. техн. наук

НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская область

Изготовлен и исследован прототип пеленгатора кругового обзора на матричных приемниках излучения. В нем используются 4 ПЗС-камеры, установленные по кругу с шагом 90° и наклоном 35°. Угловое разрешение составляет 0,5°–1°. Рассмотрены возможные применения предлагаемого устройства.

Коды OCIS: 230.1150.

Поступила в редакцию 29.07.2004.

Вопросы создания и совершенствования пеленгаторов секторного и кругового обзора постоянно находятся в сфере внимания разработчиков оптико-электронных устройств [1–3]. Современная тенденция заключается в повсеместном внедрении длинных линеек (с числом элементов более 128) и матричных приемников [3]. Особый интерес разработчики и потребители проявляют к устройствам без подвижных оптико-механических элементов [3, 4]. Перспективным направлением является их применение для обнаружения и определения параметров движения зенитных ракет и реактивных снарядов по излучению факела двигателя [4]. В последнее время за рубежом появился ряд устройств, работающих в ультрафиолетовом или инфракрасном диапазоне, либо в двух одновременно. Они построены на базе матричных приемников, имеют широкое поле обзора, при размещении 6–8 датчиков на самолете или вертолете обеспечивают круговой обзор в верхней и нижней полусферах.

По этим причинам была предпринята попытка создания прототипа пеленгатора кругового обзора на базе матричных приемников излучения. В силу доступности для исследований были выбраны ПЗС-матрицы.

Рассматривались варианты оптической части на 4 и 6 матрицах с короткофокусными объективами. В табл. 1 представлены расчетные углы зрения для типовых объективов с матрицей размером 4,8×3,6 мм. В последнем столбце приведены оценки углового разрешения по горизонтали (без учета аберраций) применительно к матрице с 500 элементами в строке. Из-за дисторсии реальные поля зрения превышают значения, рассчитываемые по геометрическим формулам. По этой же причине на краях поля наблюдается сжатие масштаба. Поэтому при одном и том же размере пятна рассеяния разрешение на краю будет ниже.

В случае 4 матриц предполагается горизонтальная ориентация строк с полем зрения около 100° в направлении длинной стороны. При 6 каналах, наоборот, длинная сторона ориентируется вертикально. Поле зрения вдоль короткой стороны матрицы в этом случае должно быть не менее 70°. Эксперименты с горизонтальной и вертикальной ориентациями камер показали, что последний вариант неестественен для визуального восприятия и требует устройства поворота изображения. Сомнительное преимущество вертикальной компоновки состоит в полном перекрытии полусферы. В обоих случаях фокусное расстояние объектива должно быть 2,5 мм.

Для экспериментальной отработки разработан и изготовлен макет устройства (далее по тексту "прототип"). В основу была положена схема с четырьмя каналами, размещенными по кругу с шагом 90° и наклоном 35° относительно горизонта. Устройство обеспечивает круговой обзор (360°) по азимуту и рабочую зону –5°...+75° по углу места. Внешний вид прототипа со снятой крышкой показан на рис 1.

В качестве приемников применены бескорпусные камеры PCS-504C3 (ЗАО "Электроника и видеосистемы", Санкт-Петербург), имеющие малые габариты (32×32×35 мм с объективом). В них используется матрица ICX-255AL (фирма "Sony") 4,8×3,6 мм

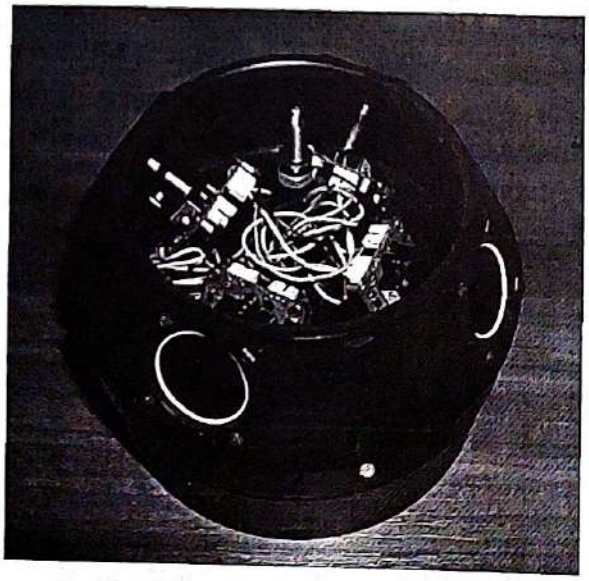

Рис. 1. Прототип пеленгатора без верхней крышки.

Таблица 1. Расчетные углы зрения для типовых объективов

Фокусное расстояние, мм	Относительное отверстие	Угол зрения, град		Разрешение, угл. мин
		по горизонту	по вертикали	
2,1	2,5	120	90	15
2,5	2,5	100	75	12
2,9	2	90	68	11
3,6	2	70	52	8,5
4,3	2	58	43	7
6	2	40	30	4,8

Таблица 2. Результаты измерения ширины полей зрения для различных углов места

Угол места, град	Поле по горизонту/положение центра, град			
	Камера 1	Камера 2	Камера 3	Камера 4
0 (внизу поля)	92/46	92/135	92/226	92/315
35 (в центре поля)	108/47	108/134	107/225	106/314
70 (вверху поля)	128/48	130/133	127/224,5	126/313

с 500×582 элементами размером 9,8×6,3 мкм. Установкой перемычек реализуются режимы с автоматической регулировкой времени накопления и усиления и с фиксированным временем накопления или усилением.

Используемые объективы имеют дисторсию (рис. 2). В табл. 2 представлены данные измерений ширины полей зрения для трех углов места. Макет устанавливался на поворотном столе со шкалой (цена деления 0,5°). Выход на границы поля зрения контролировался по изображению светодиода на телевизионном (ТВ) мониторе. Ширина поля в плоскости горизонта составила 92°, в центре 107°, а вверху поля 128°.

Несмотря на то что камеры предварительно ориентировались поворотом плат относительно оптической оси, из табл. 2 следует, что имеет место остаточное отклонение от вертикали. Результаты измерений указывают на увеличение углового поля по мере роста угла места. Это обстоятельство приводит к перекрытию полей в соседних каналах, что иллюстрирует рис. 2. На нем представлены три изображения. Первые два (а и б) получены съемкой координатной сетки двумя смежными камерами макета (угол поворота составляет 45° относительно оси первой камеры). Третье изображение (в) получено наложением первых двух.

Анализ углового разрешения показал, что по углу места целесообразно ограничить дискретность определения координаты по вертикали двумя строками (12,6 мкм). Этот вывод следует из того, что в

(а)

(б)

(в)

Рис. 2. Изображения двух смежных камер. а – камера № 1, б – камера № 2, в – результат наложения.

камерах используются матрицы с чересстрочной организацией. Кадр состоит из двух полей (полукадров), содержащих четные или нечетные строки. Длительность прохождения поля составляет 20 мс. При выводе полукадра с четными строками заряды, накопленные в альтернативных строках, сбрасываются в подложку и теряются. Соответственно источники, умещающиеся в пределах одной строки, с длительностью свечения менее 20 мс могут быть пропущены. Поэтому размер изображения должен превышать 2 строки.

Исследование аберраций показало, что по всему полю пятно рассеяния не превышает 30 мкм на

полувысоте (в случае монохроматического излучения качество изображения выше). Это соответствует засветке 3 элементов в строке и 5–6 строк.

Далее прорабатывались алгоритмы определения координат источника излучения. Вследствие аберраций и рассеяния распределение энергии в изображении даже точечного объекта имеет некоторое плавное распределение. В процессе преобразования видеосигнала пороговой схемой размер пятна в однобитовом изображении зависит от соотношения амплитуды сигнала и установленного порога. При высокой интенсивности излучения происходит "увеличение" изображения из-за насыщения сигнала на оси и "подъема" амплитуды периферийных участков пятна. По этой причине простейший алгоритм определения координаты объекта дает существенную погрешность.

В общем случае адекватным оказывается алгоритм определения координат путем вычисления положения центра тяжести пятна по формулам

$$X_0 = (1/A)\Sigma_{ij=A} X_{ij}, \quad (1)$$

$$Y_0 = (1/A)\Sigma_{ij=A} Y_{ij}, \quad (2)$$

где X_0 и Y_0 – координаты центра тяжести изображения, X_{ij} и Y_{ij} – координаты элементов изображения, превышающих порог; A – площадь изображения или число единичных элементов разложения; i, j – номера элемента в строке и строки.

Детальность оцифровки вдоль строки зависит от частоты квантования видеосигнала. С учетом представленных соображений разумное разрешение отсчета на матрице составляет 200–250 точек вдоль строки (что соответствует 20–25 мкм) и 291 строку по вертикали. В результате исходная сетка матрицы 500×582 становится грубее в два раза. Определение координат вдоль строки и номера строки обеспечивается счетчиками.

С другой стороны, для реальной формы и размеров в 10–20 единичных элементов ошибка положения меньше выбранной дискретности. Из формул (1) и (2) следует, что точность зависит от площади и стремится к $1/A$.

Далее рассматривался переход из системы координат на матрице (m, n) в сферическую систему координат (φ_0, ε_0) пространства предметов с компенсацией дисторсии оптической системы. На первом этапе выполняется преобразование координат для отдельно взятого канала

$$\alpha = F_D(n - n_0, m - m_0), \quad (3)$$

$$\beta = F_D(n - n_0, m - m_0), \quad (4)$$

где α и β – положение луча в сферической системе координат с нулем на оптической оси канала; n_0, m_0 – координаты элемента разложения, расположенного на оси объектива (канала).

Теоретическое рассмотрение и анализ собственных данных (рис. 2) позволили предположить, что дисторсия имеет осевую симметрию [5, 6]. Поэтому удобно перейти из декартовой системы координат n, m в полярную с координатами $\mathbf{r}$ и ψ. Вектор $\mathbf{r}$ вычисляется по формуле

$$r = \{[(n - n_0)\Delta_n]^2 + [(m - m_0)\Delta_m]^2\}^{1/2}, \quad (5)$$

а угол ориентации ψ вектора $\mathbf{r}$ – по формуле

$$\mathrm{tg}\psi = n\Delta_n/m\Delta_m + \psi_0. \quad (6)$$

Здесь Δ_n и Δ_m – шаги координатной сетки вдоль строки и по кадру сверху вниз совпадают, ψ_0 – угол между вертикалью сферической системы координат и осью Y матрицы (он возникает из-за ошибки ориентации матрицы).

При таком подходе дисторсия объектива $F_D(\mathbf{r})$ становится одномерной функцией вектора $\mathbf{r}$. Для получения искомой зависимости нужно решить систему уравнений

$$\left.\begin{aligned} &\cos(\pi/2 - \varepsilon) = \cos\gamma\cos(\pi/2 - \varepsilon_0) + \\ &+\sin\gamma\sin(\pi/2 - \varepsilon_0)\cos(\psi - \psi_0), \\ &\sin(\psi - \psi_0)/\sin(\pi/2 - \varepsilon) = \\ &= \sin(\varphi - \varphi_0)/\sin\gamma, \\ &\gamma = F_D(\mathbf{r}), \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

где ε, φ – сферические координаты источника подсветки; ε_0, φ_0 – сферические координаты оси приемного канала; γ – угол между направлением на источник и оптической осью приемного канала в сферической системе координат.

На рис. 2 были показаны изображения сетки двумя смежными камерами. Сетка нанесена на плоскую поверхность с шагом, равным расстоянию между осями объективов приемных каналов. Она наклонена на угол 35° относительно вертикали. Изображения получены на компьютере с платой видеозахвата, состоящей из 768×576 квадратных пикселов со стороной 6,3 мкм. Верхнее изображение (а) не резкое, а на правом заметна ошибка угловой ориентации матрицы (ψ_0). Указанные погрешности не оказывают влияния на процедуру определения зависимости $F_D(\mathbf{r})$, но сказываются на работе пеленгатора в целом. Поэтому измерение сферических координат опорных точек производится в собранном и отъюстированном виде. Всего выбирается не менее 9 точек на изображении, расположенных в центре (одна) и на краях ПЗС-матрицы, необходимых для определения функции дисторсии объектива и ориентации приемных матриц. Таким образом, для каждого канала определяются реперные точки с координатами (m_i, n_i) и соответствующие сферические координаты (α_i, β_i).

Подстановка в выражения (3) и (4) координат опорных точек и решение системы уравнений (7) дает табличные функции преобразования

$$\varphi = F_{\varphi}(n, m) \text{ и } \varepsilon = F_{\varepsilon}(n, m), \qquad (8)$$

где φ и ε – углы азимута и места. Эти функции для каждого канала после кусочно-гладкой аппроксимации записываются в память видеоконтроллера.

Электронная схема содержит четыре одинаковых канала и объединяющую часть, обеспечивающую пространственно-временную селекцию и информационный обмен. Синхросигналы выделяются из полного видеосигнала с помощью микросхем селекции и используются видеоконтроллером (на микропроцессоре Atmega128) для синхронизации процесса квантования и обработки изображения. Эти же сигналы используются в схеме восстановления постоянной составляющей (уровня черного). Битовое кодирование видеосигнала производится компаратором. Порог срабатывания устанавливается программно 4-канальным цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) индивидуально. Уровень может быть постоянным либо адаптивным исходя из уровня помех и фона. Управление ЦАП осуществляется центральным контроллером по SPI-интерфейсу.

Для снижения загрузки видеоконтроллера и синхронизации ввода данных последовательный битовый поток регистром преобразуется в параллельный 8-разрядный поток. Схема обработки изображения осуществляет построчное накопление текущего поля видеосигнала в памяти видеоконтроллера, определяет для каждого изолированного пятна контуры, координаты центра тяжести и проводит предварительную обработку. В итоге объекту приписываются следующие показатели: координаты центра тяжести, эффективная площадь и размеры по двум координатам. Видеопроцессор также осуществляет геометрическую коррекцию кадра.

Параметры объектов со всех каналов поступают в центральный микроконтроллер (на базе Atmega 128), который проводит анализ области наложения полей и исключает коллизии при появлении объекта в двух каналах. Это снижает избыточность и объем обрабатываемой информации.

Электронная часть содержит общие блоки: совмещения видеоканалов, межкадровой обработки и временной селекции, интерфейса выдачи информации на исполнительное устройство и связи с ЭВМ, видеокоммутатор и схему питания. Аналоговый сигнал с коммутатора используется в ходе настройки и регламентных работ для наблюдения на мониторе и контроля с помощью телевизионного осциллографа.

Для селекции объектов по временным параметрам нужно идентифицировать объекты на последовательности полей. Каждому объекту нового полукадра ставится в соответствие объект предыдущих полей. При этом учитывается, что объекты могут перемещаться. При наблюдении объекта в течение прохождения нескольких полей осуществляется лишь обновление информации (координаты, размеры, длительность сигнала). В противном случае объект классифицируется как новый, и ему присваивается очередной номер. Дополнительно анализируется исчезновение объекта. В процессе работы в памяти хранится и обновляется информация о 8–16 объектах.

Для управления и отображения информации использовался компьютер. Связь с ним осуществляется по последовательному интерфейсу RS-232 [7]. Он обеспечивает отображение координат объектов, управление порогами компараторов, коммутацию видеосигналов на ТВ монитор, запись и редактирование встроенной программы.

Второй интерфейсный канал RS-232 предназначен для передачи данных в исполнительные устройства. Он может трансформироваться в варианты со спецификациями RS-485, RS-422 или "токовая петля" [7]. Информация об объектах обновляется с частотой полукадров (50 Гц).

Конструктивно электронная часть смонтирована на одной плате и размещена в нижней цилиндрической части корпуса пеленгатора. Элементы выбраны с расширенным температурным диапазоном. Для защиты от конденсации плата и элементы покрыты влагостойким лаком. Сбоку корпуса отсека электроники установлены разъемы питания, интерфейсных каналов и контроля видеосигналов. Разъемные соединения уплотнены прокладками.

В рамках натурных исследований прототип применялся для обнаружения факта подсветки и пеленгации источника лазерного излучения. В этом случае камеры работали с "полностью открытым" электронным затвором и регистрировали излучение в течение прохождения всего ТВ поля (20 мс) во избежание пропусков импульсов подсветки. Для согласования облученности и энергетической экспозиции от типовых источников лазерной подсветки с динамическим диапазоном камер, а также спектральной селекции применялись светофильтры из стекол ИКС-5 и ТС-3. Они подавляют излучение неба и ослабляют прямую солнечную засветку до уровня, безопасного для ПЗС-матрицы. Спектральная чувствительность показана на рис. 3. На длине волны 1,06 мкм пороговая экспозиция для импульсов длительностью от 10 нс до 2 мс была менее 2×10^{-6} Дж/м^2, а пороговая облученность для импульсно-периодического или непрерывного излучения составляет $\sim10^{-4}$ Вт/м^2.

В сравнении с традиционными индикаторами лазерного излучения ТВ пеленгатор имеет повышенное в 10 раз угловое разрешение [8] и позволя-

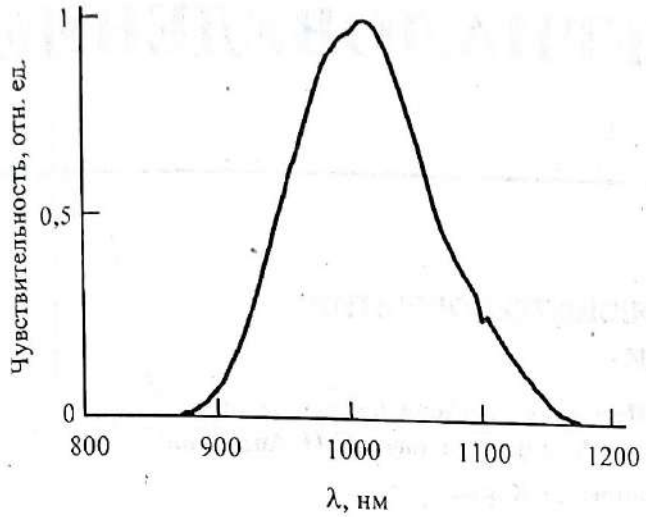

Рис. 3. Спектральная чувствительность для случая регистрации излучения с длиной волны 1,06 мкм.

ет фиксировать как однократные импульсы, так и подсветку импульсно-периодическим и непрерывным излучениями.

Другим возможным применением подобных устройств является обнаружение и определение параметров движения зенитных ракет и реактивных снарядов по излучению факела твердотопливного двигателя [4]. Для проведения экспериментов в этом случае использовались фильтры, выделяющие область 340–380 нм. В этом случае излучение объекта присутствует в течение нескольких секунд. Поэтому нет опасности пропуска сигнала при уменьшении времени накопления. Камеры работают в режиме с автоматической регулировкой времени накопления и сами адаптируются под уровень фона. При времени накопления около 20 мс пороговая облученность в этом диапазоне оказалась на уровне 10^{-7} Вт/м^2. Натурные исследования показали, что пеленгатор днем обнаруживает и сопровождает объекты с пороховыми двигателями на дальностях до 2 км. В ночные и вечерние часы дальность работы повышается в несколько раз.

Предложенные оптическая схема и алгоритм работы электронной части являются общими для приборов с ТВ выходным сигналом. Угловое разрешение по обеим координатам составляет 1°, несмотря на большую точность аппаратной части. Угловые координаты объекта представляются двумя байтами. Аппаратная часть имеет 2–4-кратный запас по точности определения угловых координат. Переход с однобитового на 8-разрядное представление видеосигнала позволит повысить показатели аппаратуры и потребует только усовершенствования электронной части.

В заключение можно сделать вывод о возможности и перспективности создания пеленгаторов кругового обзора на базе матричных приемников, особенно с учетом активности разработчиков и производителей отечественных приборов, возросшей в последние годы [9]. Отсутствие подвижных узлов и унификация снижают сложность и стоимость устройств наряду с повышением их надежности, создают необходимые предпосылки для комплексирования разных спектральных каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983.
2. Авиационные системы информации оптического диапазона: Справочник / Под. ред. Криксунова Л.З. М.: Машиностроение, 1985.
3. *Елизаров А.В., Куртов А.В., Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г.* Обзорно-панорамные оптико-электронные приборы // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2002. Т. 45. № 2. С. 37.
4. Противодействие зенитным управляемым ракетам с инфракрасным наведением // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2000. № 5. С. 52.
5. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика. М., Искусство, 1978.
6. *Русинов М.М.* Техническая оптика. Л., Машиностроение, 1979.
7. *Гук М.* Аппаратные средства PC. Энциклопедия. СПб.: Питер Ком, 1998.
8. *Орлов В.А., Петров В.И.* Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. М.: Воениздат, 1989.
9. Тезисы докладов XVIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: НПО "Орион", 2004.