

07; 08

© 1991 г.

СПЕКТРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВИДЕОФИЛЬТРА И АКУСТООПТИЧЕСКОГО РАЗВЕРТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Л. В. Балакин, В. И. Балакиев, В. Б. Волошинов, О. В. Мионов

Описана система обработки изображений среднего ИК диапазона, включающая в себя акустооптический видеофильтр с перестраиваемой полосой пропускания и акустооптическое устройство визуализации отфильтрованного ИК изображения. Система позволяет с телевизионной скоростью и разрешением до 120 элементов в строке осуществлять спектральный анализ изображений в диапазоне от 2.8 до 4.7 мкм со спектральным разрешением 30 нм.

Введение

Оптическая обработка изображений в инфракрасном (ИК) диапазоне играет важную роль во многих отраслях науки и техники, в промышленности и медицине. Знание поверхностного и объемного распределения температуры различных тел позволяет получать информацию о строении этих объектов, о физических, биологических и других процессах, происходящих в исследуемых телах. В настоящее время среди устройств обработки ИК изображений, построенных на различных физических и технических принципах [1, 2], особое место занимают перестраиваемые широкоапертурные акустооптические фильтры (АОФ), осуществляющие спектральную фильтрацию изображений [3, 4]. Такие видеофильтры характеризуются высоким быстродействием, близким к единице коэффициентом пропускания, узкими полосами спектрального разрешения, возможностью электронной перестройки в широком интервале длин волн излучения. АОФ допускают спектральную обработку оптических изображений как в видимом, так в ближнем [5] и среднем [6] ИК диапазонах. Наиболее широкими функциональными возможностями обладают видеофильтры, использующие кристаллы парателлурита (TeO_2) с неколлинеарной геометрией акустооптического взаимодействия. Способность АОФ работать со световыми пучками, имеющими угловые оптические апертуры свыше 50° [5], обеспечивает высокое пространственное разрешение отфильтрованного изображения.

Создание реального устройства фильтрации на основе акустооптических фильтров среднего ИК диапазона предполагает прием и обработку отфильтрованного изображения. В ближнем ИК диапазоне (0.8—1.2 мкм) для этой цели успешно используются электронно-оптические преобразователи [5]. В видимом и ближнем ИК диапазонах весьма перспективны ПЗС матрицы. В среднем ИК диапазоне для визуализации изображений используются тепловизоры с одноэлементным приемником излучения, относительно которого с помощью оптико-механического сканирующего устройства происходит развертка изображения как по строке, так и по кадру [2]. Однако применение перечисленных устройств, как правило, ограничено спектральным диапазоном приемников. Многоэлементные ПЗС матрицы имеют существенный разброс чувствительности от элемента к элементу, в среднем ИК диапазоне они практически не используются. Оптико-механические системы обладают относительно низким быстродействием и невысокой надежностью.

В данной работе представлены результаты оптоэлектронной обработки ИК изображений акустооптическим способом. Обработка изображений включает в себя спектральную фильтрацию оптического сигнала с помощью АОФ и последующую визуализацию отфильтрованного изображения с использованием акустооптического развертывающего устройства (АРУС) [3, 7].

Описание экспериментальной установки и основные результаты

Блок-схема спектрального акустооптического тепловизора, выполненного на основе перестраиваемого широкоапертурного АОФ и визуализирующего устройства типа АРУС, представлена на рис. 1. В основе работы оптоэлектрон-

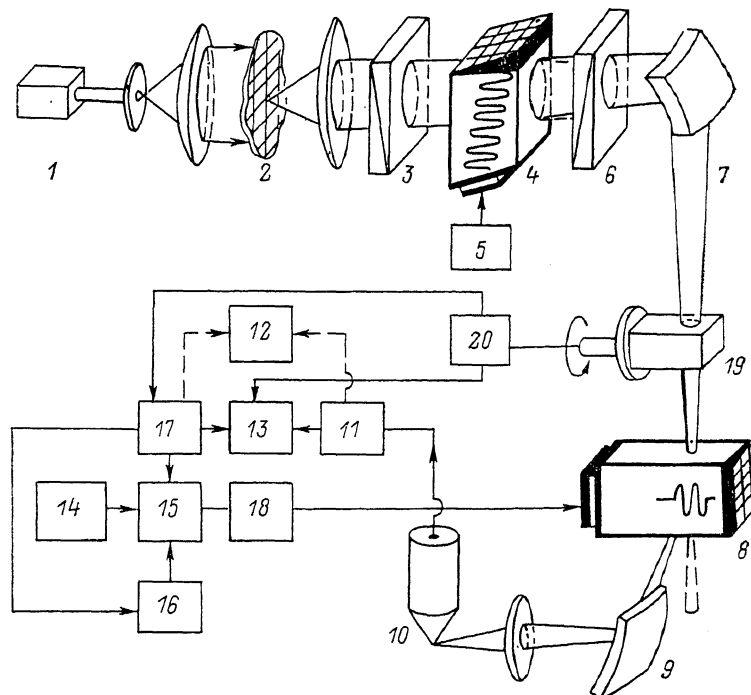


Рис. 1.

ной системы лежит явление дифракции электромагнитного излучения на дифракционной решетке, созданной в кристалле акустической волной.

Пучок ИК излучения от источника 1, пройдя через объект 2 и поляризатор 3, падал на входную оптическую грань АОФ 4. Ультразвуковая волна возбуждалась в ячейке фильтра с помощью ВЧ генератора электрических колебаний 5. На выходе фильтра дифрагированный пучок, несущий отфильтрованное изображение объекта, выделялся анализатором 6 и, отразившись от зеркала 7, падал на акустооптическую ячейку 8, являющуюся основным элементом АРУС. При этом сферическое зеркало 7 формировало изображение визуализируемого объекта в плоскости ячейки 8.

В ячейке 8 возбуждалась бегущая акустическая волна в виде короткого импульса. Проходя через ячейку, анализируемый световой пучок дифрагировал на акустическом пуге. Дифрагированное излучение регистрировалось ИК приемником 10, расположенным в фокальной плоскости сферического зеркала 9. Поскольку дифракция происходила лишь в области локализации пуга, то при его пробегании по ячейке на приемник последовательно поступала информация об интенсивности различных точек изображения вдоль траектории движения пуга. Таким образом, каждый возбуждаемый в ячейке пуг формировал на выходе фотоприемника видеосигнал развертки отдельной строки изображения.

Видеосигнал, усиленный усилителем 11, наблюдался на экране осциллографа 12 в случае, когда измерялось распределение интенсивности излучения в ИК изображении, или подавался на телевизионный монитор 13 для наблюдения визуализированного изображения.

Для возбуждения в ячейке 8 акустического цуга электрические колебания с частотой 11 МГц от ВЧ генератора 14 поступали на модулятор 15 ключевого типа, в котором с помощью двух синхронно работавших генераторов прямоугольных импульсов разной полярности 16 и 17 формировался радиоимпульс. Радиоимпульс подавался на широкополосный усилитель мощности 18, а затем на пьезопреобразователь ячейки.

Развертка ИК изображения по кадру производилась механическим дефлектором 19 — прямоугольной призмой из арсенида галлия, вращавшейся с частотой 50 Гц. Дефлектор был расположен перед ячейкой 8, им осуществлялось смещение всего изображения в целом ортогонально направлению распространения ультразвука в ячейке. Для кадровой синхронизации использовался сопряженный с дефлектором датчик кадровой развертки 20. Строчная синхронизация осуществлялась импульсами генератора 17. Следует отметить, что кадровая развертка может быть выполнена без использования оптико-механического элемента, например с помощью акустооптического дефлектора [3].

Акустооптический видеофильтр, использованный в системе оптоэлектронной обработки изображений, был изготовлен из кристалла TeO_2 . Парателлуриит прозрачен в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах вплоть до длины волны $\lambda = 5$ мкм. Поэтому фильтрация может быть выполнена как в видимом, так и в ИК диапазонах. В фильтре был реализован оптимальный с точки зрения величины угловой апертуры и спектрального разрешения режим анизотропной брэгговской дифракции света на ультразвуке [3]. Взаимодействие электромагнитного излучения и ультразвука происходило в плоскости (110) кристалла. В плоскости взаимодействия волновой вектор звука был ориентирован под углом 18.9° к направлению [110]. Пьезопреобразователь из ниобата лития з-среза с линейными размерами 6.7×2.2 мм генерировал сдвиговые акустические волны в полосе частот $f = 29 - 48$ МГц.

При изменении частоты ультразвука фильтр перестраивался в диапазоне длин волн $\lambda = 2.8 - 4.7$ мкм. Спектральное разрешение устройства в коллимированном свете, измеренное на длине волны $\lambda = 3.4$ мкм, оказалось равным $\lambda/\Delta\lambda = 100$, полоса пропускания $\Delta\lambda = 300 \text{ \AA}$. Угловая оптическая апертура фильтра достигала 50° . При работе с сильно расходящимися световыми пучками на выходе АОФ происходит пространственное перекрытие прошедшего и отфильтрованного излучения. В таком случае селекция полезного оптического сигнала осуществляется с помощью анализатора 6, скрещенного с поляризатором 3. Возможна работа фильтра без поляризационных приспособлений. Конструкция прибора при этом оказывается проще, однако угловая апертура устройства должна быть уменьшена до 9° . При управляющей электрической ВЧ мощности 4 Вт коэффициент пропускания АОФ на длине волны $\lambda = 3.4$ мкм был равен 30%. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования использованного фильтра [6] показали, что число разрешимых элементов в кадре отфильтрованного изображения достигает величины $10^5 - 10^6$, т. е. не уступает телевизионному стандарту.

Ячейка АРУС 8 также была выполнена из кристалла парателлурита. Сдвиговая акустическая волна возбуждалась вдоль оси [110], световое излучение проходило через ячейку под углом Брэгга вблизи оси [001]. Ячейка имела апертуру $w = 31$ мм, что обеспечивало считывание изображения по строке с телевизионной скоростью за время $\tau = w/v = 50$ мкс (v — скорость звука в кристалле).

Число разрешимых элементов в строке изображения N определяется выражением [3]

$$N = \frac{Rw}{vT} = \Delta f \tau, \quad (1)$$

где T — длительность подаваемого на пьезопреобразователь радиоимпульса, Δf — ширина спектра видеосигнала.

Коэффициент K зависит от параметров ячейки и типа акустооптического взаимодействия. Для использованной ячейки значение K равнялось 0.6. Как следует из соотношения (1), разрешение АРУС можно легко менять, варьируя длительность радиоимпульсов. В экспериментальной установке при изменении T в диапазоне 1—0.25 мкс число разрешимых элементов возрастало с 30 до 120. Однако при этом соответственно уменьшалась мощность дифрагированного света и ухудшалось отношение сигнал/шум. Предельное разрешение ограничивалось полосой пьезопреобразователя (порядка 4 МГц).

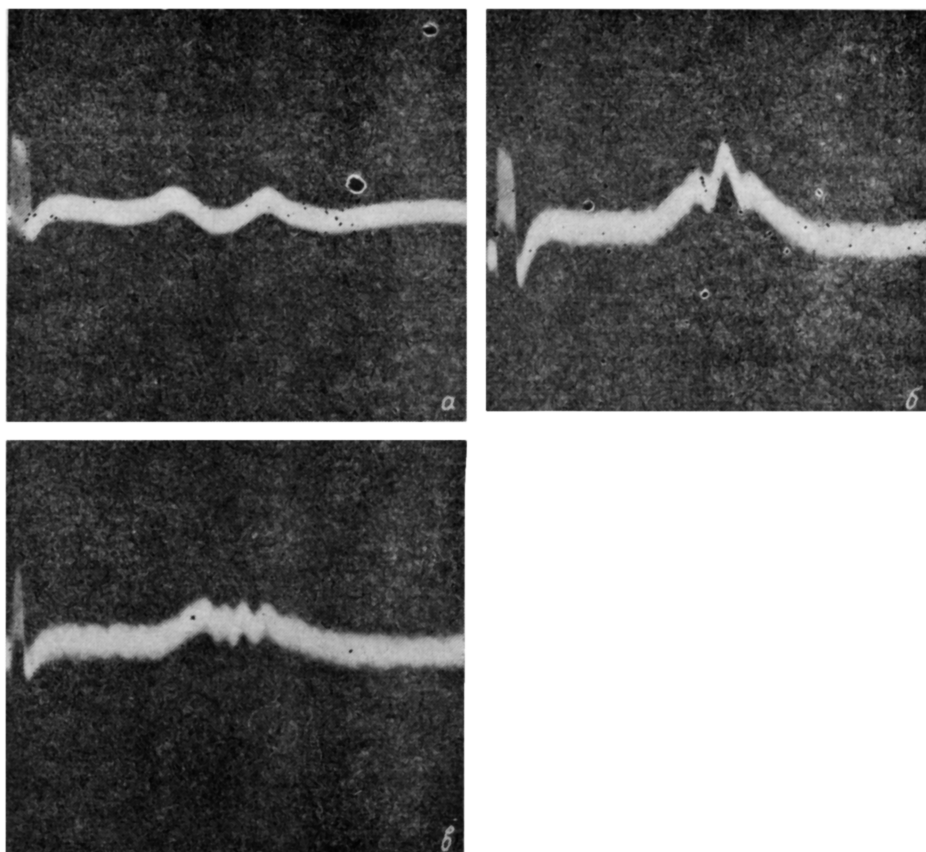


Рис. 2.

В качестве фотоприемника использовался фоторезистор $\text{Ge} : \text{Au}$ с удельной обнаружительной способностью $10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Пропускание оптической системы АРУС составляло 20 %. Пиковая мощность электрических радиоимпульсов была порядка 30 Вт, что обеспечивало на длине волны излучения $\lambda = 3.4 \text{ мкм}$ эффективность дифракции в ячейке АРУС около 50 %. Большие оптические потери и невысокая чувствительность ИК приемника явились причиной того, что предельная чувствительность АРУС составляла всего лишь 10^{-4} Вт/см^2 при $T = 1 \text{ мкс}$. Однако чувствительности оказалось достаточно, чтобы продемонстрировать принципиальную возможность акустооптической фильтрации и визуализации изображений.

Невысокая чувствительность системы, достигнутая в эксперименте, не позволила получить качественные изображения сложных объектов. На рис. 2 представлены осциллограммы видеосигналов АРУС, когда в качестве анализируемого объекта использовалась одномерная решетка, изготовленная из металлической проволоки диаметром 0.5 мм. Рис. 2, *a—b* иллюстрирует случаи, когда по сечению светового пучка ИК излучения укладывались соответственно один, два и три элемента решетки. Длительность радиоимпульсов при этом была $T = 1 \text{ мкс}$, отношение сигнал/шум 8 дБ.

Заключение

Проведенные исследования показывают перспективность использования акустооптического взаимодействия как для узкополосной спектральной фильтрации оптических изображений в ИК диапазоне, так и для последующей их визуализации. Основным достоинством описанной системы является высокая скорость обработки информации. Система обеспечивает анализ как в одном спектральном интервале длин волн излучения, так и в нескольких спектральных интервалах одновременно. Допускается электронное управление коэффициентом пропускания всей системы, коммутация каналов и т. д., что доказывает универсальность акустооптических оптоэлектронных устройств анализа оптических изображений. К достоинству акустооптических систем можно отнести отсутствие оптико-механических блоков, использование которых увеличивает габариты и уменьшает быстродействие и надежность тепловизоров. Чувствительность акустооптических систем анализа может быть повышена по крайней мере на два порядка, если использовать приемники с большей обнаружительной способностью, например фотодиоды на основе InSb, InAs. К повышению чувствительности приведет и применение просветленной оптики.

Список литературы

- [1] Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
- [2] Госсорг Ж. Инфракрасная термография: основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 399 с.
- [3] Балакиши В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
- [4] Беликов И. Б., Буймистрюк Г. Я., Волошинов В. Б. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 20. С. 1225—1229.
- [5] Волошинов В. Б., Миронов О. В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 17. С. 1541—1544.
- [6] Волошинов В. Б., Миронов О. В., Молчанов В. Я. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 4. С. 69—72.
- [7] Балакиши В. И., Кукушкин А. Г., Манкевич С. К. и др. // Квайтовая электрон. 1985. Т. 12. № 4. С. 743—748.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Физический факультет

Поступило в Редакцию
22 мая 1990 г.
В окончательной редакции
12 мая 1991 г.