

В. А. ГОЛОВКОВ, С. В. СОЛК

## ОДНОЭЛЕМЕНТНЫЙ ТЕРМОДЕТЕКТОР

Рассматриваются принципы построения простых одноэлементных термодетекторов для обнаружения биологических объектов на фоне природных образований. Предложено в качестве фотоприемника использовать термоэлементы, что позволяет отказаться от механического или ручного сканирования тепловой цели. Приведена методика расчета дальности обнаружения различных биологических объектов (в частности, человека). Рекомендована элементная база для реализации оптической и электронной частей термодетектора.

**Ключевые слова:** термодетектор, термоэлемент, дрейф сигнал, обнаружительная способность, оптическая схема, испытательный стенд, оптические материалы.

Цель настоящей работы — проектирование, изготовление и испытание прибора, функционирование которого не требует ручного или механического сканирования.

Термодетекторы, предназначенные для использования службами спасения, должны иметь минимально возможные массу и габариты и устойчиво работать при изменении температуры окружающей среды. Приемник излучения должен иметь минимальный дрейф, чтобы позволить в течение продолжительного времени обнаруживать теплые объекты без необходимости осуществлять ручное сканирование местности или частую принудительную калибровку. Требования к быстрдействию термодетектора не столь важны, они определяются реакцией человека и могут составлять десятые доли секунды, что позволяет использовать накопленный сигнал, для уменьшения влияния изменяющейся температуры внешней среды приемник должен быть адаптивным.

Из существующих типов тепловых приемников излучения [2] наиболее удобны в использовании термоэлементы, которые оснащаются термосопротивлениями для оценки температуры холодных спаев, что позволяет производить их адаптацию при изменении температуры окружающей среды и компенсировать дрейф. Для усиления сигнала в термодетекторе целесообразно использовать операционные усилители (ОУ), имеющие малый фликкершум, так как работа термодетектора осуществляется в области сигналов низкой частоты. Сигналы можно обрабатывать с помощью недорогих микроконтроллеров и сообщать об обнаружении тепловой цели с помощью шкалы светодиодов, как и в известных термодетекторах.

Нами исследовался термоэлемент MLX90247, выпускаемый фирмой Melexis. Рабочий спектральный диапазон термоэлемента  $7,5 \leq \lambda \leq 13,5$  мкм, чувствительная площадка термоэлемента размером  $1,2 \times 1,2$  мм, спектральная величина шума термоэлемента  $v = 32$  нВ/Гц<sup>1/2</sup>.

Поскольку температура кожи человека  $32$  °С [3], то

$$\Delta\Phi = \frac{\sigma T^3 \Delta T A_{\text{ист}} D^2}{R^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta\Phi$  — приращение величины потока излучения от источника (обнаруживаемого объекта),  $A_{\text{ист}}$  — площадь источника излучения,  $R$  — расстояние до объекта,  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>),  $T$  — радиационная температура источника,  $D$  — диаметр объектива приемника. Приращение сигнала  $\Delta U = \Delta\Phi S$ , где  $S$  — чувствительность

приемника, среднеквадратичная величина шума приемника  $v\sqrt{\Delta f}$ , тогда отношение сигнал/помеха:

$$\rho = \frac{\Delta U}{v\sqrt{\Delta f}},$$

( $\Delta f$  — энергетическая полоса частот усилителя после приемника) при этом, используя выражение (1), получим:

$$\rho = \frac{S\sigma T^3 \Delta T A_{\text{ист}} D^2}{R^2 v \sqrt{\Delta f}}.$$

Отсюда получим разность значений температуры объектов типа абсолютно черное тело (АЧТ), которую может обнаружить термодетектор:

$$\Delta T = \frac{\rho R^2 v \sqrt{\Delta f}}{S\sigma T^3 A_{\text{ист}} D^2}. \quad (2)$$

Оценим разность  $\Delta T$ , которую может обнаружить термодетектор на базе термоэлемента MLX90247. Поскольку речь идет об обнаружении объекта в режиме ручного поиска, то при отношении сигнал/помеха  $\rho = 10$ —12 вероятность обнаружения теплового объекта будет достаточно велика, для  $R = 200$  м,  $A_{\text{ист}} = 400$  см<sup>2</sup> (примерно площадь человеческого лица),  $\Delta f = 3$  Гц,  $D = 6$  см получим из (2)  $\Delta T = 10$  К. На расстоянии 100 м получим различаемую разность температур  $\Delta T \approx 2,5$ —3 К.

Если заданы не величина  $S$  и  $v$ , а удельная обнаружительная способность  $D^*$  [см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт] и площадь приемника  $A_{\text{пр}}$  [3], тогда очевидно соотношение:

$$D^* = \frac{S\sqrt{A_{\text{пр}}}}{v},$$

выражение (2) преобразуется к виду

$$\Delta T = \frac{\rho R^2 \sqrt{A_{\text{пр}} \Delta f}}{D^* \sigma T^3 A_{\text{ист}} D^2}.$$

Поле зрения объектива определяет точность наведения на цель и динамический диапазон работы термодетектора, который можно представить как  $\Delta\Phi/\Phi$  — приращение потока от объекта по отношению к фоновому излучению. Величина  $\Delta\Phi/\Phi$  должна быть ориентировочно не меньше  $10^{-3}$ , иначе на фоне большого сигнала будет затруднено обнаружение малого. Наиболее неблагоприятный вариант возникает, когда АЧТ малых размеров появляется на фоновом АЧТ с меньшей температурой. Определим поток от фоновой поверхности:

$$\Phi = \frac{MA_{\Phi} A_0}{\pi R^2} = \frac{\sigma T^4 \pi D^2 \left(\text{tg} \frac{\gamma}{2}\right)^2}{4},$$

где  $A_0$  — площадь объектива,  $A_{\Phi}$  — площадь фоновой поверхности на расстоянии  $R$ ,  $M$  — светимость фоновой поверхности,  $\gamma$  — двойной (полный) угол зрения объектива. Из выражения (2) получим соотношение для  $\gamma$ :

$$\gamma = 2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Phi}{\Delta\Phi} \frac{4\Delta T A_{\text{ист}}}{\pi R^2 T}}$$

Тогда для расстояния 100 м при разрешаемой разности температур  $\Delta T \approx 3$  К, величине  $\Delta\Phi/\Phi = 10^{-3}$ ,  $A_{\text{ист}} = 400$  см<sup>2</sup> и температуре фонового АЧТ  $T = 300$  К получим  $\gamma \approx 1^\circ$ . Возможность обнаружения биологических объектов в других природных условиях, на фоне серых тел с меньшей излучательной способностью, выше, так как температурный контраст возрастает, а при одной и той же температуре серого тела и АЧТ эквивалентная радиационная температура серого тела может быть ниже [4]. Это предполагает существование теплового контраста между биологическими объектами и окружающей средой.

Летом, в ночных условиях, температура подстилающей поверхности всех разновидностей редко превышает 20 °С [4], что создает еще больший температурный контраст.

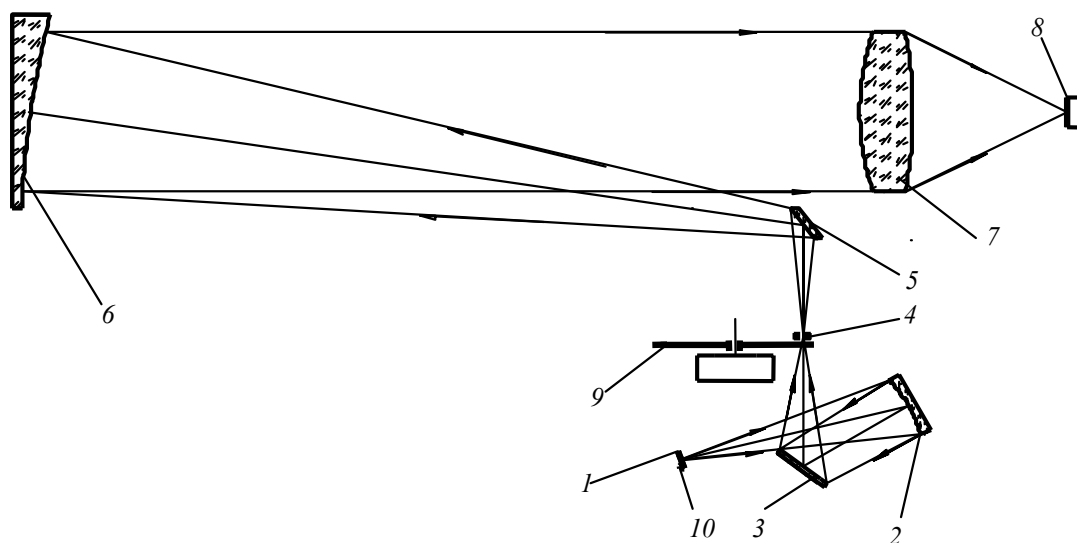
При использовании на местности термодетектора целесообразно провести его калибровку путем наведения на участок „холодной“ местности, где гарантированно отсутствуют биологические объекты, например на листву деревьев или на небо. При этом светодиодная шкала должна быть выставлена примерно посередине. После этого термодетектором можно сканировать участки местности и оценивать их тепловой контраст.

Нами был создан макет термодетектора на базе термоэлемента MLX90247, микропроцессора ADuC812 с частотой кварца 11 МГц, светодиодной шкалой из 8 светодиодов, питанием от батарейки 9 В типа Крона и двухзеркальным объективом с диаметром входного зрачка 60 мм. В термодетекторе использовались операционные усилители с малым уровнем фликкер-шума типа AD8628. При калибровке термодетектора на „холодной“ местности автоматически включались 3 светодиода младших разрядов. Как показали результаты предварительных испытаний, в дневное время в условиях мелколесья человек уверенно обнаруживается на расстоянии около 100 м при температуре окружающей среды около 15 °С.

В данной работе нами использовался объектив Ньютона с диаметром входного зрачка 70 мм, фокусным расстоянием 100 мм и коэффициентом экранирования порядка 0,5. Пропускание объектива в диапазоне 7,5—13,5 мкм составляло 93 %, а концентрация энергии составляла 84 % в пятне диаметром 0,3 мм. Испытания оптической системы совместно с приемниками различных типов проводились в несколько этапов. На первом этапе использовался коллиматорный стенд (см. рисунок). Источник инфракрасного излучения 1, в качестве которого был использован керамический излучатель, с помощью зеркального конденсора 2 и плоского зеркала 3 проецировался на тест-объект 4 (круглая диафрагма) установленной в фокальной плоскости внеосевой параболы 6 зеркального коллиматора (5 — диагональное плоское зеркало). Объектив 7 создавал изображение тест-объекта в своей фокальной плоскости, с которой совмещается чувствительная поверхность фотоприемника 8. В зависимости от принципа работы фотоприемного устройства в оптическую схему может быть включен механический модулятор потока излучения 9. Температура керамического излучателя контролировалась контактным способом с помощью термопары 10. Диаметр диафрагмы зависел от площади и расстояния до обнаруживаемого объекта и имитировал его угловой размер. Значение температуры керамического излучателя отличалось от значения реальной температуры обнаруживаемого объекта и служило для качественного сравнения различных вариантов прибора.

На втором этапе определялась минимальная разрешаемая разность температур  $\Delta T$  между объектом и фоном. На требуемом расстоянии от прибора помещался экран с равномерным фоном при  $T_\Phi$ . Размер экрана превышал линейное поле зрения оптической системы. Перед экраном помещался объект с переменной температурой  $T_0$ , площадь которого была равна площади обнаруживаемого объекта, при этом  $\Delta T = T_0 - T_\Phi$ . Исследования проводились в измерительном зале при нормальных условиях.

На третьем этапе измерения проводились в реальных условиях на полигоне при различной температуре окружающей среды, в дождь и туман, а также при других условиях, усложняющих работу прибора. В качестве обнаруживаемых целей использовались как биологические (люди, животные) объекты, так и техногенные (автомобили).



Простейшие термодетекторы на базе одиночных фотоприемников целесообразно реализовывать, используя термоэлементы, что позволяет работать в статическом режиме, обнаруживая цель и удерживая ее в поле зрения без использования механических модуляторов или ручного сканирования. Для обработки сигналов в термодетекторе целесообразно применять простые однокристалльные микропроцессоры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров А. Ф., Иванов В. М. Современные зарубежные тепловизионные приборы // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 10. С. 62—71.
2. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
3. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 696 с.
4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.

#### Сведения об авторах

- Владимир Алексеевич Головков** — канд. техн. наук; НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый бор, Ленинградская обл.; старший научный сотрудник; E-mail: golovkov\_ggg@mail.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — канд. техн. наук; НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый бор, Ленинградская обл.; начальник научно-производственного отдела ИК-оптики; E-mail: solk@sbor.net

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию  
07.04.09 г.