

В. А. ГОЛОВКОВ, В. Н. ЕМЕЛЬЯНОВ, С. В. СОЛК

ОБНАРУЖЕНИЕ НАГРЕТЫХ ДВИЖУЩИХСЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

Рассмотрена задача обнаружения артиллерийского снаряда в инфракрасном диапазоне с использованием крупногабаритных оптических систем и неохлаждаемых тепловизионных матриц болометрического типа.

Ключевые слова: артиллерийская разведка, фотоприемное устройство, оптико-механическая система.

Научные исследования в области астрофизики, баллистические эксперименты, а также проведение антитеррористических операций связаны с обнаружением нагретых движущихся объектов. В настоящей статье рассматривается одна из задач артиллерийской разведки — обнаружение летящих снарядов и их сопровождение на участке полета в целях проведения траекторных измерений для дальнейшего определения точки вылета.

При разработке математической модели, позволяющей прогнозировать динамику температурного поля снаряда в процессе его движения по траектории, можно выделить два основных этапа формирования температурного поля, отличающиеся по физическому содержанию процессов теплообмена. Первый этап — это нагрев снаряда во время его движения по каналу ствола. Анализ показывает, что основным фактором здесь является поверхностное и объемное тепловыделение в ведущем пояске, температура которого 800—1000 К в момент выхода снаряда из ствола. Второй этап характеризует теплообмен снаряда с воздушной средой в процессе его движения по траектории.

Процессы аэродинамического нагрева и охлаждения перегретых во время выстрела областей снаряда, а также теплопроводность материала оболочки снаряда формируют нестационарное температурное поле снаряда. Для его

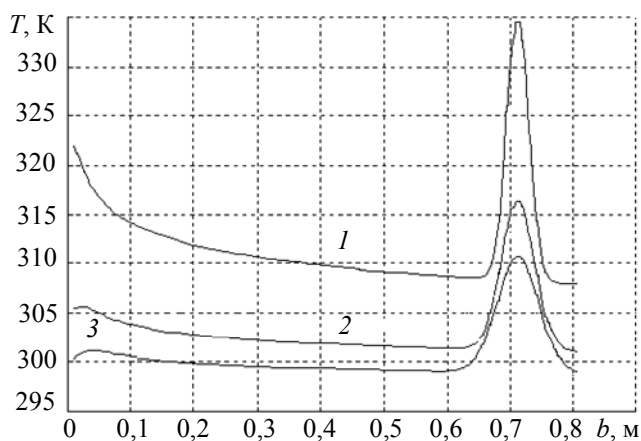


Рис. 1

оценки была построена математическая модель, включающая в себя описание комплекса процессов различной физической природы, которые определяют динамику нестационарного температурного поля снаряда. На рис. 1 приведен график распределения температурного поля $T(b)$, рассчитанного вдоль поверхности снаряда (длиной b) калибра 152 мм, имеющего начальную скорость $V = 800$ м/с и угол возвышения ствола около 50° ; здесь кривая 1 соответствует 10 с полета начиная от момента выстрела, кривая 2 — 30 с, кривая

3 — 50 с; ведущий поясок расположен на расстоянии около 0,7 м от головной части снаряда.

Таким образом, на поверхности снаряда имеются две зоны повышенной температуры: зона носовой части снаряда, нагреваемая трением об атмосферу, и зона ведущего пояска, имеющая значительный начальный перегрев и остывающая в полете. Как видно из расчета, температура ведущего пояска в течение 10 с снижается от 800—1000 К до 340 К.

Для экспериментальной оценки температурного поля снаряда в полете было разработано оптико-электронное устройство. Его основой является фотоприемный модуль БП-2М на базе полупроводникового болометра; спектральный диапазон работы БП-2М — 2...15 мкм.

Модуль имеет обнаружительную способность $D^* = 2 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, интегральную вольтовую чувствительность $S = 10^4 \text{ В/Вт}$. Фокусное расстояние встроенной иммерсионной линзы из германия, находящейся перед фоточувствительным элементом, составляет 3 мм. Полоса частот БП-2М ограничена внутренним усилителем с фильтром на уровне 100 Гц. Сигнал модуля дополнительно усиливался внешним усилителем с коэффициентом усиления $K = 30 \text{ дБ}$.

Болометрический модуль стыковался с телескопом, имеющим следующие характеристики: диаметр входного зрачка 80 мм, увеличение 10^{\times} , эквивалентное фокусное расстояние 30 мм, коэффициент пропускания около 60 %, плоский угол зрения приемного устройства 4 мрад по уровню 0,5; оптико-электронное устройство было калибровано на измерительном стенде, что позволило оценивать температуру нагретых тел дистанционно.

Эксперименты проводились на артиллерийском полигоне при безоблачном небе, в отсутствие тумана, в дневное время в течение 6 ч. Солнечная засветка приемного устройства была исключена. В ходе экспериментов температурное поле снаряда калибра 152 мм со скоростью вылета из ствола $V \approx 600 \text{ м/с}$ оценивалось на дистанциях 32, 40 и 55 м от артиллерийского орудия, при этом наблюдение за снарядом осуществлялось сбоку на дистанциях 39, 45 и 55 м. Время пролета снаряда в поле зрения оптической системы составляло 3, 3,2 и 4 мс в соответствии с положением системы и дистанцией до снаряда; время нахождения ведущего пояска снаряда в поле зрения системы составляло 0,51, 0,65 и 0,91 мс. Изменение угла места β приемного устройства (совпадающего с оптической осью объектива) осуществлялось таким образом, чтобы получить максимальное значение сигнала; в результате пролет снаряда наблюдался в центральной зоне диаграммы направленности. Сигнал, поступающий с выхода приемного устройства через интерфейсную плату, записывался в программе персонального компьютера как текстовый файл. После обработки результатов измерений стало очевидно, что сам корпус снаряда не вносил существенного вклада в результирующий сигнал, основной сигнал формировался малоразмерным элементом на корпусе снаряда.

Таким образом, как показали результаты эксперимента, наиболее нагретым элементом снаряда является ведущий поясок, ширина которого составляет 3 см. Радиационная температура ведущего пояска оценивается как $T = 425 \text{ К}$. Ведущий поясок выполняется из меди, коэффициент излучения которой $\varepsilon \approx 0,08 \dots 0,1$. Тогда физическую температуру ведущего пояска можно рассчитать следующим образом:

$$T_{\text{ф}} = T / \sqrt[4]{\varepsilon},$$

она составит $T_{\text{ф}} \approx 760 \dots 800 \text{ К}$. Отсюда превышение температуры ведущего пояска снаряда относительно температуры воздуха ($T_{\text{в}} \approx 290 \text{ К}$) на дистанции наблюдения 30 м может достигать 740—780 К. Это не противоречит расчетным данным, и можно считать, что температура корпуса снаряда во время полета, в том числе и его головной части, в среднем выше температуры поверхности Земли и приземного воздуха не более чем на 10 К.

Будем считать, что скорость снаряда не превышает $1 \dots 3M$, где M — число Маха. Максимальная оценка температуры воздуха вблизи тела, летящего со скоростью звука, как следует из уравнения Бернулли [1],

$$T_{\text{в max}} = T_{\text{в}} \left(1 + r \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right),$$

где r — коэффициент восстановления, в приземных слоях атмосферы $r \approx 0,87$; γ — отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении к теплоемкости воздуха при постоянном объеме ($\gamma \approx 1,4$).

Для приведенных выше скоростей снаряда получим температуру воздуха вблизи снаряда $T_{в\max} \approx 300 \dots 800$ К.

Длина волны, соответствующая максимуму энергии излучения, составляет, по закону Вина, $\lambda_{\max} = 4 \dots 10$ мкм для скоростей $1 \dots 3$ М; при этом окна прозрачности атмосферы наблюдаются в диапазоне 4,5—5 мкм и 8—14 мкм. Однако коэффициент поглощения тела и, согласно закону Кирхгофа, коэффициент его излучения пропорциональны друг другу. Газы же имеют низкую плотность и соответственно низкий коэффициент поглощения. Таким образом, интенсивность излучения нагретого газа, по-видимому, будет мала. Снаряд покрыт органической краской серо-голубого цвета. Органические краски и лаки в ИК-диапазоне, согласно работе [2], имеют спектральный коэффициент поглощения $\alpha(\lambda, T)$ и соответственно коэффициент теплового излучения $\varepsilon(\lambda, T)$, близкие к единице. Краска является диффузным излучателем и, в первом приближении, можно считать, что снаряд в ИК-диапазоне является аналогом абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой в среднем примерно на 5—10 К выше температуры воздуха, при этом время полета составляет 10—30 с.

Так как объекты наблюдаются на фоне неба, целесообразно рассмотреть фоновое излучение неба. На рис. 2 приведены графики спектральной плотности яркости чистого неба и АЧТ [3], полученные в ночное время: кривые 1 и 4 — спектральная плотность яркости АЧТ при температуре 281 и 300 К соответственно; кривая 2 — спектральная плотность яркости неба при угле места $\beta=0$ и $T_{в} = 281$ К; кривая 3 — то же, при $\beta = 3,6^\circ$ и $T_{в} = 281$ К; кривая 5 — то же, при $\beta = 0$ и $T_{в} = 300$ К; кривая 6 — то же, при $\beta = 3,6^\circ$ и $T_{в} = 300$ К.

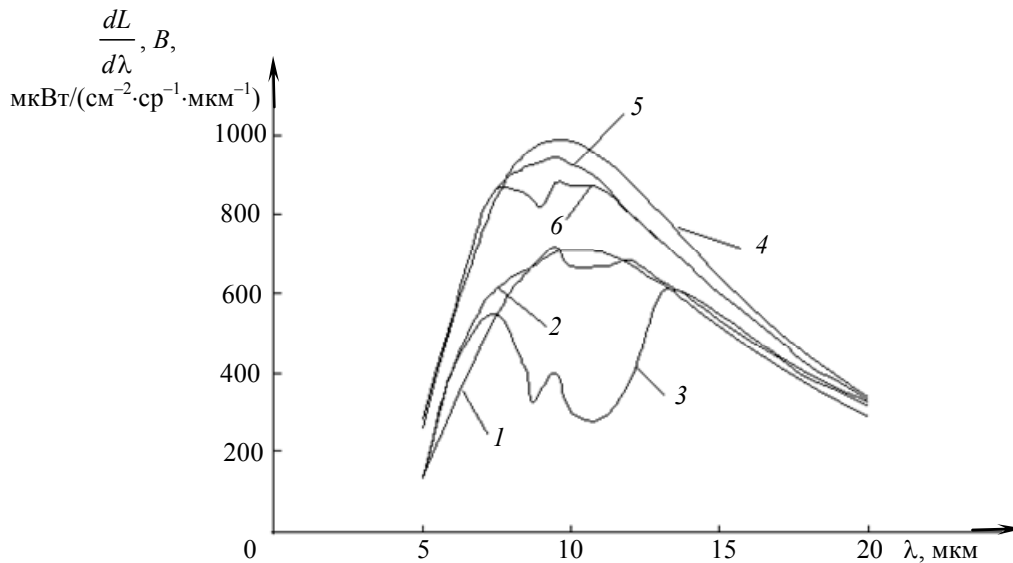


Рис. 2

Спектральная плотность яркости излучения АЧТ рассчитывалась по формуле Вина [4]:

$$B(\lambda, T) = \frac{dL(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right), \quad (1)$$

где $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-12}$ Вт·см², $c_2 = 1,4388$ см·К.

Анализ рис. 2 показывает, что даже при небольших значениях угла места спектральная яркость неба $dL/d\lambda$ при $\lambda \approx 10$ мкм существенно отличается от спектральной яркости АЧТ (B). Приведенные в работе [3] измерения спектральной плотности яркости чистого и облачного неба (перистые облака) показывают, что величина $dL/d\lambda$ при наличии облачности в большей мере приближается к величине B , однако уже при $\beta=7,2^\circ$ величина $dL/d\lambda$ для облачного неба примерно на 15—20 % ниже значения B .

В работе [5] измерены спектральные плотности полусферической яркости небосвода: кривые имеют такой же характер, как и на рис. 2, т.е. „провал“ кривых спектральной яркости при $\lambda = 7,5 \dots 14$ мкм, при этом утверждается, что спектральная яркость излучения дневных и ночных атмосфер для этого диапазона длин волн практически не отличаются.

Таким образом, анализ фоноцелевой обстановки позволяет считать, что пассивное обнаружение воздушных целей с небольшой эффективной отражающей площадью и при отсутствии активных источников излучения (реактивных или ракетных двигателей) целесообразно проводить в диапазоне 8—10 мкм, где даже при небольших углах места устройства наблюдается высокий контраст цели на фоне неба.

Как показывает опыт, для решения задач артиллерийской разведки может быть использована двухзеркальная оптическая система с линзовым блоком переноса изображения, минимизирующим фоновое излучение. Также блок переноса может компенсировать полевые аберрации. Так как требуемая оптико-механическая система (ОМС) ИК-прибора работает в спектральном диапазоне 8—14 мкм, то целесообразно изготавливать оба зеркала из алюминиевого сплава АМг-6 методом алмазного микроточения (АМТ). Использование алюминиевого сплава позволяет значительно упростить конструкцию главного и вторичного зеркал. Для разгрузки главного зеркала применяются упругие кинематические элементы, изготавливаемые из единой с зеркалом заготовки. Формообразование на станке АМТ позволяет добиться угловых и линейных децентрировок в пределах нескольких секунд и микрометров. Коэффициент отражения в рабочем спектральном диапазоне не менее 96 %. Блок переноса — трех- или четырехлинзовый. Линзы изготавливаются из керамики ПО-4 и германия. Линзовые блоки выполняются герметичными, и их внутренние полости заполняются осушенным газообразным азотом или другим подобным газом. Компенсация термоаббераций осуществляется перемещением линзового блока или вторичного зеркала. Поле зрения такого прибора зависит от размеров фоточувствительного слоя фотоприемного устройства (ФПУ) и может составлять 1—2° при относительном отверстии 1:3. Минимально возможное пятно рассеяния при этом будет составлять 75 мкм (84 % энергии).

Проведем оценку дальности обнаружения артиллерийского снаряда современными техническими средствами ИК-диапазона. Согласно работе [6] для неохлаждаемых фотоприемных устройств спектрального диапазона 8—14 мкм эквивалентная шуму разность температур составляет величину порядка 0,1°, размер элемента (пиксела) фотоприемной матрицы можно принять равным приблизительно 50×50 мкм. Для точечного источника излучения минимально обнаруживаемое значение силы света [7]

$$\Delta I = \frac{4}{\pi} p \frac{\delta l^2}{v \mu D^* \dot{D} \ddot{O}} \sqrt{\Delta f}, \quad (2)$$

где p — коэффициент превышения сигналом порогового значения, δ — угловая разрешающая способность фотоприемного элемента, l — дистанция до снаряда, v — коэффициент пропускания оптической системы, μ — коэффициент пропускания атмосферы, D^* — удельная обнаружительная способность, D — диаметр входного зрачка объектива, \ddot{O} — относительное отверстие объектива, Δf — полоса пропускания электрического фильтра после приемника.

С учетом того, что матричные ФПУ „опрашиваются“ с частотой кадров 50—60 Гц, полюсу частот можно принять равной $\Delta f \approx 100$ Гц исходя из времени накопления сигнала одним пикселом. Величина $\delta = \sqrt{s_{\text{п}}}/F$, где $s_{\text{п}}$ — площадь пиксела, F — фокусное расстояние объектива. С учетом использования в ФПУ микроболометров удельную обнаружительную способность можно принять равной $D^* \approx 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Величина $\mu = \exp(-kl)$, где k — спектральный коэффициент затухания, который при $\lambda = 8 \dots 14$ мкм, дальности видимости

20 км и влажности воздуха 50 % составит $k \approx 0,1 \text{ км}^{-1}$. Для зеркально-линзовых ОМС коэффициент $\nu \approx 0,6$. Величина $\Delta I = \Delta L_{\min} s_{\text{сн}}$, где ΔL_{\min} — минимально обнаруживаемая яркость объекта, $s_{\text{сн}}$ — видимая площадь снаряда.

Учитывая, что фотоприемная матрица совместно с полосовым оптическим фильтром в дальнем ИК-диапазоне (8—12 мкм) может быть чувствительна в полосе пропускания $\Delta\lambda \approx 3 \dots 4$ мкм, получим $\Delta L = B(\lambda, T)\Delta\lambda$. Тогда, например, для случая, когда $T_{\text{в}} = 281 \text{ К}$ в приземной атмосфере, а температура головной части снаряда на 5—10 К выше, учитывая выражение (1) и графики спектральной плотности яркости (см. рис. 2), можно определить разность яркостей снаряда и фона $\Delta L \approx 1000 \text{ мкВт}/(\text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1})$ при угле места объектива не меньше $3,6^\circ$. Допустим, что снаряд калибра 152 мм движется в направлении на объектив ФПУ и находится в поле зрения пиксела фотоприемной матрицы в течение не менее чем 20 мс. Тогда, задаваясь параметрами реально разработанных зеркально-линзовых объективов (например, при $D = 50 \text{ см}$, $\ddot{O} = 3$) и считая коэффициент $p = 5$, можно решить уравнение (2) относительно максимальной дальности обнаружения, которая составит $l_{\text{max}} \approx 5 \dots 6 \text{ км}$. Учитывая размер фотоприемной матрицы и параметры объектива, поле зрения такой системы можно оценить величиной порядка 20 мрад. Разумеется, при изменении погодных условий и угла места ОМС эта величина может изменяться в большом диапазоне, что характерно для оптико-электронных систем.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

— обнаружение артиллерийских снарядов в пассивном режиме целесообразно проводить в спектральном диапазоне 8—14 мкм, где даже при небольших углах места оптической системы возможно получение высокого контраста цели на фоне неба;

— возможно создание пассивных систем артиллерийской разведки при помощи тепловизоров даже с неохлаждаемыми ФПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеевский В. С., Галицкий Б. М., Глебов Г. А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Наука, 1975. 649 с.
2. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 534 с.
3. Bell E., Eisner R., Young J., Oetjen R. Spectral radiance of sky and terrain at wavelengths between 1 and 20 microns // J. of Optical Society of America. 1960. Vol. 50, N 12. P. 1313—1320.
4. Гуревич М. М. Фотометрия. Теория: методы и приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
5. Афонин А. В., Казанский В. В., Яцык В. С. Моделирование спектральной освещенности элементов земной поверхности от небосвода в ИК-области спектра // Оптич. журн. 2000. Т. 67, № 10. С. 22—24.
6. Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
7. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.

Сведения об авторах

- Владимир Алексеевич Головков** — канд. техн. наук; НИИ оптико-электронного приборостроения, Со-
сновый Бор, Ленинградская обл.; E-mail: golovkov_ggg@mail.ru
- Владислав Николаевич Емельянов** — д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический
университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра плазмогазодина-
мики и теплотехники, Санкт-Петербург; E-mail: ve5303@mail.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — канд. техн. наук; НИИ оптико-электронного приборостроения, Со-
сновый Бор, Ленинградская обл.; E-mail: solk@sbor.net

Рекомендована кафедрой
плазмогазодинамики и теплотехники
БГТУ „Военмех“

Поступила в редакцию
12.02.13 г.