



Рис. 6. Отражение от спектроразделительного покрытия в ИК-области спектра.

Для сравнения показано отражение от зеркала из алюминия

Авторами разработаны подобные зеркала, обеспечивающие получение отражения более 98 % при углах

падения излучения до 60°. Сложность достижения таких высоких коэффициентов отражения обусловлена поляризационными эффектами, возникающими при больших углах падения.

Поисковые работы во всех этих направлениях продолжаются.

Литература

1. Энперс В. Пропускание атмосферы в оптических диапазонах: Справочник по лазерам/Под редакцией А. М. Прохорова. — М.: Советское радио. 1978. Т. 1. С. 380—465.
2. Гайнутдинов И. С., Несмелов Е. А., Алиакберов Р. Д. Критерий качества для определения оптимальных параметров широкополосных спектроразделителей//Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 5. С. 83—86.
3. Воронкова Е. М., Гречушиников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2004 г.

Optical coatings for modern thermal imaging systems

*I. S. Gainutdinov, R. S. Sabirov, V. A. Ivanov, E. A. Nesmelov,
R. D. Aliakberov, R. G. Safin*
State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

Design results of one-and two-range AR coatings, spectrodichroic coatings and high-reflection mirrors for the thermal imaging devices of the new generation are presented in this report.

УДК 621.384.3

Алгоритм приведения результатов испытаний тепловизионного прибора к нормированным значениям параметров и условий визирования объекта наблюдения

М. М. Трестман, Н. И. Харьковская,
ФГУП «Научно-производственное объединение "Государственный институт прикладной оптики"»,
г. Казань, Россия

По результатам испытаний тепловизионного прибора реструктурируют инфракрасную (ИК) сигнатуру объекта наблюдения на фрагменты, формирующие его видеобраз. Дальность распознавания для нормированных условий вычисляют как дальность обнаружения фрагментов видеобраза, замещаая их эквивалентными мирами.

Приведение (пересчет) результатов испытаний тепловизионного прибора (ТВП) по определению дальности действия к нормированным условиям визирования типового объекта наблюдения (ТОН) основано на использовании уравнения для вычисления дальности действия (*D*) ТВП. Характеризуя

влия обнаружение (распознавание) ТОН с разрешением мира, эквивалентной ИК-сигнатуре ТОН [1—3].

Так, используя экспоненциальную аппроксимацию зависимости МРРТ от частоты мира, частоту разрешаемой эквивалентной мира (ω_m) и соответствующее ей значение *D* вычисляют как [2, 4]

© Трестман М. М., Харьковская Н. И., 2007

мира-фон (MFD), значение *D* вычисляют, отождеств-

$$\omega_m = (\mu a)^{-1} \ln \left[\frac{\Delta T \tau_a(D) (N \varepsilon / 3,5)^{0,5}}{K_T K_S(P) NETD m} \right], \quad (1)$$

$$D = \omega_m N / h,$$

где ω_m — частота мира, мрад⁻¹;

$NETD$ — разность температур, эквивалентная шуму ТВП при температуре 300 К и зрительного анализатора на частоте Найквиста, К;

a — номинальный размер мгновенного поля зрения ТВП, мрад;

m и μ — параметры аппроксимации $MPPT(\omega)$ на интервале пространственных частот, большем 80 % частоты Найквиста;

ΔT — усредненное значение разности радиационных температур (PPT) "ТОН-фон" по площади визируемой поверхности ТОН, равной $(H \times B)$, м;

$\varepsilon = B/H$ — формат площади;

h — критический размер площади $(H \times B)$: наименьший из (H, B) и как вариант — среднее геометрическое $(H \times B)^{0,5}$, м, при этом $\varepsilon = 1$;

$\tau_a(D)$ — ослабление оптического излучения ТОН атмосферой на трассе протяженностью D км в диапазоне спектральной чувствительности ТВП;

K_T — коэффициент учета изменения $NETD$ с изменением температуры фона (среды); при $T_f = 300$ К, $K_T = 1$;

$K_S(P)$ — отношение сигнал—шум (С/Ш) в зрительном анализаторе (ЗА) оператора для вероятности P , нормированное к С/Ш для вероятности $P = 0,5$ различения эквивалентной миры;

N — число периодов эквивалентной миры, вписанное в критический размер (h) площади $(H \times B)$, — критерий Джонсона.

Параметр N может быть интерпретирован как относительная величина фрагмента площади $H \times B$, который должен обеспечить накопление С/Ш в ЗА, адекватное заданной вероятности обнаружения (распознавания) ТОН.

Обнаружение ТОН на фоне с различной степенью тепловой неоднородности адекватно накоплению С/Ш в ЗА с фрагмента площадью $(H \times B)/2N$.

Обнаружению ТОН на равномерном фоне (предельный случай) соответствует $N = 0,5$: площадь фрагмента равна всей площади $(H \times B)$.

При слабой тепловой неоднородности фона $N = 0,75$ (1,00), а при сильной — $N \rightarrow 3$.

В задаче распознавания ТОН площадь фрагмента также равна $(H \times B)/2N$. Значение N определяется заданной вероятностью и алфавитом классов объектов, из которых необходимо распознать ТОН. Так, в частности, ТОН типа "танк" распознают с вероятностью 0,5 из объектов колесной автотехники при $N = 2,0$, а из объектов автотехники на гусеничном ходу при $N = 4$. В первом случае площадь фрагмента равна $0,25(H \times B)$, во втором — $0,125(H \times B)$.

Нормированные значения N и прогнозируемые значения D определяют с учетом множественного подхода

к указанным выше факторам, включая уровень квалификации оператора.

Испытания ТВП проводят, не обеспечивая такого подхода. Степень тепловой однородности фона оценивают субъективно. Не определяют ИК-сигнатуры алфавита класса объектов, из которых распознают ТОН, ограничиваются параметрами ИК-сигнатуры зачетного ТОН, усредненными по всей визируемой поверхности. Ограничено число операторов. Распознавание ТОН вырождается в обнаружение априори известного видеобраза, определяющего его принадлежность к классу ТОН, в обнаружение фрагментов ИК-сигнатуры. Сравнения видеобраза ТОН с видеобразами других объектов не происходит.

Дальность распознавания ТОН как дальность обнаружения фрагментов ИК-сигнатуры может быть вычислена по уравнениям (1). Так, реструктурируя ИК-сигнатуру ТОН на фрагменты, вычисляют их площади $(H_i \times B_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ и PPT "фрагмент—фон" — ΔT_i .

В критические размеры фрагментов (h_i) вписывают N_i периодов эквивалентных мир, вычисляют частоты разрешаемых мир (ω_{mi}) , а по ним — D_i .

Дальность распознавания ТОН — та, на которой обнаруживают все фрагменты ИК-сигнатуры.

По зафиксированным в испытаниях ТВП параметрам ИК-сигнатуры ТОН, метеопараметрам, частоты (P_1) правильного обнаружения (распознавания) ТОН на дальностях D^* и по числу (l) операторов, участвовавших в испытаниях, вычисляют адекватные значения N^* и ω_m^* , используя уравнения (1)

$$N^* = \frac{h}{D^* \mu a} \ln \left[\frac{\Delta T \tau_a(D^*) (N^* \varepsilon / 3,5)^{0,5}}{K_T K_S^*(P_1) NETD m} \right]; \quad (2)$$

$$\omega_m^* = N^* D^* / h,$$

где $\Delta T = \Delta T_0$, $h = h_0$, $N^* = N_0^*$ — для задачи обнаружения и задачи распознавания ТОН по усредненным параметрам всей ИК-сигнатуры ТОН;

$\Delta T = \Delta T_i$, $h = h_i$, $N^* = N_i^*$ — для задачи обнаружения фрагментов видеобраза ТОН;

D^* — значение дальности, зафиксированной в испытаниях, км;

$K_S^*(P_1)$ — расчетное значение $K_S(P)$, соответствующее реализованному в испытаниях критерию обнаружения (распознавания): частоты P_1 и числу операторов l ;

$\tau_a(D^*)$ — ослабление оптического излучения ТОН атмосферой на трассе протяженностью D км, рассчитанное для значений температуры среды, влажности и метеорологической дальности видимости (МДВ) в условиях испытаний ТВП, в частности по [5];

ω_m^* — частота эквивалентной миры, адекватной условиям и результатам испытаний ТВП, мрад⁻¹; ее период — угловое разрешение ТВП.

Целесообразность оценки параметра N^* обусловлена тем, что различие дальностей действия ТВП, зафиксиро-

рованных в испытаниях (D^*) и пересчитанных к нормированным условиям, определяется в первую очередь различием $(h/N)^*$, вычисленным по результатам испытаний, и (h/N) для нормированных условий.

Кроме того, параметр N^* обобщенно характеризует условия обнаружения и распознавания ТОН, имевшие место в испытаниях ТВП: степень тепловой неоднородности фона и алфавита классов объектов, из которых распознан ТОН.

Необходимо отметить, что значение $N_i^* \leq 0,5$ означает, что распознавание ТОН на дальности D^* состоялось без участия i -го фрагмента видеобразы.

Прогнозирование значений D (по уравнениям 1) предполагает нормирование значений ΔT , $H \times B$, метеопараметров, заданной вероятности (частоты) и значений N для задач обнаружения и распознавания ТОН.

Согласно рекламной информации и техническим спецификациям по ТВП, в странах НАТО и США приняты следующие значения нормированных параметров ИК-сигнатуры ТОН типа "танк": $\Delta T_0 = 1,25$ К, $H \times B = (2,3 \times 6,4)$ м и $\Delta T_0 = 2$ К, $H \times B = (2,3 \times 2,3)$ м.

Для заданной вероятности $P = 0,5$ — $N = 0,75$ в задаче обнаружения и $N = 3$ — в задаче распознавания ТОН.

Ослабление оптического излучения атмосферой на трассе протяженностью 1 км принято равным $0,2 \text{ км}^{-1}$ для "хороших" и 1 км^{-1} — для "плохих" метеоусловий.

Пример применения алгоритма с использованием рекламной информации (2002 г.) о дальности действия ТВП "Catherine-FC" фирмы Thales Optronique.

Дальность обнаружения (расознавания) "танка" в поле зрения $3 \times 2,25^\circ$ равна 10,6 (3,4) км.

Предполагается, что усредненные значения параметров ИК-сигнатуры "танка" соответствуют нормированным ($\Delta T_0 = 1,25$ К, $H \times B = (2,3 \times 6,4)$ м); метеопараметры соответствуют "хорошим" метеоусловиям ($T_f = 300$ К, влажность 9 г/м^3 , МДВ = 20 км, $K_T = 1$); частость правильного обнаруже-

ния (расознавания) соответствует нормированной $K_3(P = 0,5) = 1$.

Согласно технической спецификации фирмы Thomson CSF Optronique (1998 г.), $NETD = 0,14$ К, $a = 0,13$ мрад. Параметры аппроксимации МРРТ(ω) на частоте Найквиста: $m = 0,125$, $\mu = 6,0$ [4].

Значения N^* , адекватные приведенным значениям параметров, вычисленные по (2), равны 0,68 в задаче обнаружения и 3,65 — в задаче распознавания.

Пересчет дальностей действия ТВП для $N = 0,75$ и $N = 3,0$ определил нормированные значения 10 и 4 км, соответственно, в задаче обнаружения и распознавания ТОН.

Заключение

Алгоритм приведения результатов испытаний ТВП к нормированным значениям параметров и условий визирования объекта наблюдения регламентирует метод испытаний, увязывая его с методом расчета дальностей действия ТВП по его $MRTD$ и по ИК-сигнатуре объекта наблюдения или его фрагментов, формирующих видеобраз объекта наблюдения в задаче распознавания.

Литература

1. Driggers R. G. et al. Laboratory measurement of sampled infrared imaging system performance//Opt. Eng. 1999. V. 38. № 5. P. 852–861.
2. Rotman S. R., Gordon E. S., Kovalczyk M. L. Modeling human search and acquisition performance//Ibid. 1991. V. 30. № 6. P. 824–829.
3. Алеев Р. М., Иванов В. П., Овсянников В. А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. — Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2000.
4. Трестман М. М. Дальность действия тепловизионного канала//Опτικο-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений. — М.: Российское агентство по системам управления, 2001.
5. Иванов В. П. Прикладная оптика атмосферы в тепловидении. — Казань: Новое знание, 2000.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Algorithm for bringing the results of trials of thermal imaging device to the normalized values of parameters and conditions of sighting at observation object

M. M. Trestman, N. I. Kharkova,
State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

According to the results of trials of thermal imaging device the IR signature of observation object is restructured into fragments that form its videoimage. The recognition range for normalized conditions is determined as detection range of videoimage fragments replaced with their equivalent test patterns.