

Методы и средства измерений характеристик фоноцелевой обстановки

В. В. БУТУЗОВ*, Б. В. СКВОРЦОВ**, А. С. ПЕРЦОВИЧ*,
Т. А. ЕРШОВА*, В. А. НОСИКОВ*

* ОАО «Научно-исследовательский институт «Экран», Самара, Россия

** Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева
(национальный исследовательский университет), Самара, Россия,
e-mail: skvortsov@mail.ru

Рассмотрена специальная оптоэлектронная измерительно-регистрирующая аппаратура с развитой методической и метрологической базой для определения оптических характеристик типовых подвижных и стационарных объектов, излучающих и отражающих свет в ультрафиолетовой и до дальней инфракрасной областей спектра. Приведены результаты экспериментальных исследований фоноцелевых характеристик различных объектов для спектрального диапазона 0,2—15 мкм.

Ключевые слова: измерительно-регистрирующая аппаратура, оптико-электронная система, ультрафиолетовый и инфракрасный диапазоны, фоно-целевая обстановка.

A special measuring and recording optoelectronic equipment with developed methodological and metrological base for determination of optical characteristics of standard moving and static objects radiating and reflecting the light in a wide spectral range from UV to far IR is considered. The results of experimental studies of different objects background-target characteristics for spectral range 0,2—15 μm are presented.

Key words: instrumentation, optical-electronic system, ultraviolet and infrared ranges, background-target environment.

Достоверная информация о спектроэнергетическом распределении оптических сигналов, формируемых наблюдаемыми объектами на фоне контролируемого пространства в разных спектральных диапазонах — важное условие для их идентификации и принятия управленческих решений. Комплексные оптоэлектронные системы (ОЭС) наблюдения и контроля, работающие в широком диапазоне спектра от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК) в настоящее время активно развиваются и используются не только в военной технике, но и в различных производственных технологиях [1—3].

К параметрам фоноцелевой обстановки (ФЦО) относятся спектральный состав излучения объекта, его размеры и координаты местоположения, энергетическая яркость и контрастность на фоне контролируемого пространства, распределение яркостно-энергетических характеристик по площади наблюдения и их статистическая оценка. Глобальная задача анализа ФЦО состоит в идентификации объекта в различных условиях наблюдения. Это связано с созданием и использованием спектральных оптических сигнатур целей — специальных наборов параметров ФЦО, однозначно характеризующих объект пеленгации в условиях действия электромагнитных и климатических помех.

Для создания ОЭС наблюдения и анализа ФЦО требуется специальная измерительно-регистрирующая аппаратура, одновременно работающая в нескольких диапазонах оптического спектра, обладающая гибкими возможностями современной вычислительной техники. Кроме того, аппаратура должна быть обеспечена средствами беспроводной передачи данных и имитационного моделирования сред и объектов, необходимого для оперативной калибровки системы в реальных условиях эксплуатации, а также метрологического обеспечения (калибровочные источники излучения, в частности, абсолютно черное тело). По данным исследова-

ний поток излучения, исходящий от объекта наблюдения в направлении ОЭС, в общем случае описывают выражением [4]:

$$\Phi = \tau_{\text{ср}} k [\Phi_{\text{об}}(T) + R_{\text{об}} \Phi_{\text{ф}}(T_{\text{ф}}) + \tau_{\text{об}} \Phi_{\text{ф}}(T_{\text{ф}}) + \Phi_{\text{ф}}(T_{\text{ф}})], \quad (1)$$

где $\tau_{\text{ср}}$ — коэффициент пропускания среды; k — постоянная, определяемая геометрией объекта и конструктивными параметрами ОЭС; $\Phi_{\text{об}}(T)$ — поток, испускаемый объектом при температуре T ; $R_{\text{об}}$, $\tau_{\text{об}}$ — коэффициенты отражения и пропускания объекта (в случае полупрозрачного объекта), соответственно; $\Phi_{\text{ф}}$ — поток, испускаемый окружающим фоном; $T_{\text{ф}}$ — температура фона.

Математическая модель объекта является важнейшей составляющей при разработке методики измерений. В [3, 4] подробно описаны модели, учитывающие такие факторы, как компонентный состав сжигаемого топлива, геометрию и скорость движения объекта. В статье рассмотрен экспериментально-теоретический метод оценки ФЦО, который допускает использование упрощенной модели (1) и базируется на проведении реальных натурных измерений при помощи специальной ОЭС.

Метод предполагает реализацию следующих этапов метрологической процедуры: набор исходных достоверных данных об излучении целей, фонах, прозрачности атмосферы; создание библиотеки реальных фоновых сцен, обеспечивающих моделирование различных ситуаций ФЦО; проверка результатов теоретических исследований и математических моделей поведения объектов в реальных условиях функционирования.

Требования, предъявляемые к системе наблюдения ФЦО: функционирование в различных климатических, сезонных и суточных условиях в диапазоне температур $-40...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; проведение измерений фона и целей в УФ-, видимом, среднем

и дальнем ИК-диапазонах длин волн с высоким пространственным, временным, энергетическим разрешением; широкий динамический диапазон работы по яркости; возможность обработки данных в реальном времени с задержкой не более 1 с; выдача результатов измерений оператору в единицах энергетической яркости (для фона, протяженных объектов), силы излучения (для целей), абсолютного и относительного контраста фон-объект; представление и хранение результатов измерений в виде двумерных радиационных полей для их дальнейшего использования в системах (математических моделях) обработки изображений по обнаружению и распознаванию целей; сбор и накопление экспериментальных данных; возможность сопровождения движущихся целей.

Основные параметры измерительно-регистрирующей аппаратуры, полученные на основе проведенных испытаний, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные требования к измерительно-регистрирующей аппаратуре

Параметр	Значение параметра для диапазона			
	УФ	видимого	средне-го ИК	дальне-го ИК
Матричное разрешение, мкм, не менее	320×240	320×240	320×240	320×240
Энергетическая чувствительность, не менее	10^{-15} Вт/см ²	—	0,2 К*	0,2 К*
Частота приема кадров, Гц, не менее	50	50	50	50
Поле зрения, °, не менее	5	5	5	5
Пространственное разрешение, ', не более	1	1	1	1

П р и м е ч а н и е. * В тепловых областях спектра [5] на основе статистических данных о флуктуации радиационных температур фона разброс внутрифоновых контрастов для типовых фоновых образований (степь, пашня, кустарник, заснеженное поле) не превышает 1 К, поэтому рекомендуемая регистрируемая измерительной системой разность температур, эквивалентная шуму, не должна превышать 0,2 К. Сопровождение целей происходит в диапазоне углов: 360° — по азимуту, –15...90° — по углу места, со скоростью линии визирования не менее 20 °/с.

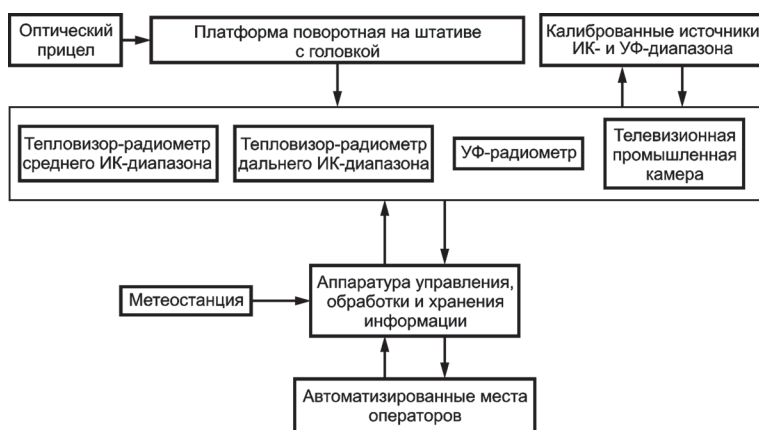


Рис. 1. Функциональная схема ОЭС наблюдения ФЦО

В соответствии с табл. 1 в состав ОЭС входят: высокоточное опорно-поворотное устройство сопровождения целей; телевизионная следящая измерительная система; тепло-визионная (двухспектральная) следящая измерительная система; УФ измерительная система; набор спектральных и нейтральных ослабительных фильтров в УФ- и ИК-диапазонах; аппаратура контроля и управления системами комплекса и регистрации информации; калибровочные источники излучения (имитаторы).

На рис. 1 представлена функциональная схема построения ОЭС наблюдения и регистрации ФЦО. Перечень оборудования, применяемого в блоке измерений характеристик ФЦО, приведен в табл. 2.

Тепловизоры-радиометры Flir Titanium 560M, Thermo Vision A325 применяют для получения изображения контролируемого пространства в среднем и дальнем ИК-диапазонах (с использованием спектральных и нейтральных ослабительных фильтров в ИК-поддиапазонах спектра). Указанные приборы являются измерительными средствами, имеющими сертификаты калибровки завода-изготовителя. Калибровка проведена в диапазонах температур 0—300 °С и –20...+300 °С, соответственно.

Телекамеру Hamamatsu C8000-10 применяют как измерительную систему для оценки и анализа уровней излучения фоновых образований и целей в УФ-диапазоне спектра (с использованием спектральных и нейтральных ослабительных фильтров в УФ-поддиапазонах спектра). Промышленная видеокамера Fastek In Line 1000 служит в качестве следящей системы видимого диапазона спектра. Управление перечисленных выше приборов осуществляется от ЭВМ.

Результаты измерений представляют в виде двумерных распределений радиационных полей (радиационной температуры) $T(x, y)$ области наблюдения; энергетической яркости $B(x, y)$ в спектральном диапазоне чувствительности применяемого оборудования (см. табл. 2) либо цифровых уровней сигнала $[D]$. Результаты измерений обрабатывают в программной среде Altair — для Flir Titanium 560M и Researcher Pro 2.9 — для Thermo Vision A325. Указанные программы обеспечивают в реальном времени прием ИК-изображений, поступающих через интерфейс камер, их визуализацию и запись на диск для дальнейшего анализа. Измерения проводят программными инструментами анализа такими, как изотерм, экспонетр, линии и области, присутствующими в окне программы Altair. Результаты отображают в окнах профиля, гистограммы, «Таблица», «Печать».

Для дальнейшего анализа зарегистрированные данные обрабатывают в программных средах Microsoft Excel или Microsoft Word.

Общий принцип первичной обработки следующий. В программном окне контуром выделяется интересующий участок ФЦО, по нему отображаются шкалы температуры, яркости (только в Altair) или уровня сигнала; минимальное, максимальное, среднее значение, среднее квадратичное отклонение и разность между значениями (суммарное значение для Altair) уровня сигнала, радиационной температуры или энергетической яркости. Температурная, яркостная шкалы или шкала уровня сигнала в рабочем окне программы автоматически показывают минимальное и максимальные значения температуры, яркости или уровня сигнала окружающей среды и объектов в ней, если таковые есть, на всей зарегистрированной картине. В нижней строке таблицы рабочего окна программы находятся значения по выделенному

Технические характеристики приборов измерительного блока ОЭС

Параметр	Значение параметра для приборов			
	Flir Titanium 560M [6]	Thermo Vision A325 [6]	Hamamatsu C8000-10 [7]	Fastek In Line 1000 [8]
Спектральный диапазон, мкм	1,5—5,1	7,5—13	0,125—1,125	0,4—0,8
Порог температурной чувствительности, мК	25 (25 °C)	70 (30 °C)	—	—
Программное обеспечение	Altair	Researcher 7.0	—	—
Интерфейс	Ethernet	Ethernet	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet
Сенсор, бит	—	—	16	24
Частота приема кадров, Гц для 640×512 пикс (время интегрирования менее 2 мс) - для 16×4 пикселей (время интегрирования менее 0,25 мс)	5—100 5—3470	60	30—131	Покадровое и автоматическое воспроизведение 1—5, 10, 15, 25, 30, 50, 60, 125, 250 кадр/с «вперед» и «назад»
Погрешность измерения температуры, мК	±20			
Предельные климатические условия, °C	–25 ... +35			
Диапазон температур, К	0—573			

контуру, верхняя строка указывает значения по всей зарегистрированной картине. Программа Altair показывает значения только по выделенному контуру.

Далее проводится конечный расчет интересующих характеристик ФЦО с учетом дальности до цели, ее геометрических размеров, состояния «оптической погоды». Коэффициент пропускания для данных условий измерений учитывается с помощью верифицированной (истинной) модели пропускания атмосферы для спектрального диапазона 0,2—15 мкм.

Энергетическую яркость объекта излучения (ОИ) рассчитывают с помощью программы Researcher Pro 2.9 по измеренной радиационной температуре в соответствии с выражением [9]:

$$B(\lambda, T) = 3,74 \cdot 10^4 \pi^{-1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\lambda^5 \left(\exp 1,44 \cdot 10^4 / (\lambda T) - 1 \right) \right]^{-1} d\lambda,$$

где λ — длина волны; λ_1, λ_2 — границы спектрального диапазона чувствительности измерительного канала.

Силу излучения J объекта вычисляют по формуле

$$J = BS/\tau_{\Delta\lambda},$$

где B — энергетическая яркость ОИ (его части), определяемая прибором; S — площадь проекции ОИ (его части); $\tau_{\Delta\lambda}$ — коэффициент пропускания атмосферы в заданном спектральном интервале на трассе ОИ—прибор.

Для подтверждения метрологических характеристик тепловизоров Flir Titanium 560M, Thermo Vision A325 и уточнения динамического диапазона измерений на базе предприятия ОАО «НИИ Экран» проводится их периодическая поверка (калибровка) по эффективной яркости входного зрачка, при помощи калиброванных абсолютно черных тел (АЧТ). В частности, находится коэффициент градуировки K , как отношение эффективной яркости входного зрачка $B_{\text{эф}}$ к сред-

нему цифровому уровню сигнала D_0 применяемых тепловизоров

$$K = \left[\int_{\Delta\lambda} B_{\text{АЧТ}}(\lambda) S(\lambda) \tau_a(\lambda) d\lambda \right] / [DL_{\text{АЧТ}}],$$

где $B_{\text{АЧТ}}(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости АЧТ для заданной температуры, определяемая по формуле Планка [9]; $S(\lambda)$ — спектральная характеристика измерительного канала, включая спектральные характеристики используемых фильтров, объектива, приемника; $\tau_a(\lambda)$ — коэффициент пропускания атмосферы на трассе ОИ—АЧТ; $DL_{\text{АЧТ}}$ — цифровой уровень сигнала прибора от АЧТ.

Выходной информацией с телекамеры Hamamatsu C8000-10 является двумерное распределение цифровых уровней сигнала $D(x, y)$, пропорционального потоку оптического излучения. Калибровка прибора проводится по облученности $E_{\text{вх}}$ входного зрачка от образцового УФ-источника, вычисляемой по формуле

$$E_{\text{вх.эф}} = \frac{1}{L^2} \int_{\Delta\lambda} I_{\text{и}}(\lambda) S(\lambda) \tau_a(\lambda) d\lambda,$$

где L — дальность до источника излучения; $I_{\text{и}}(\lambda)$ — спектральная плотность силы излучения УФ-источника; $\tau_a(\lambda)$ — коэффициент пропускания атмосферы на трассе длины L .

Далее находят K , как отношение эффективной облученности входного зрачка $E_{\text{вх.эф}}$ к сумме (по выделенному контуру ОИ) цифрового уровня сигнала DL с Hamamatsu C8000-10: $K = E_{\text{вх.эф}} / (DL)$. Коэффициент градуировки определяет чувствительность прибора и соответствие его заявленным техническим характеристикам.

На рис. 2 показаны типичные регистрируемые изображения самолета в разных диапазонах спектра при типовом

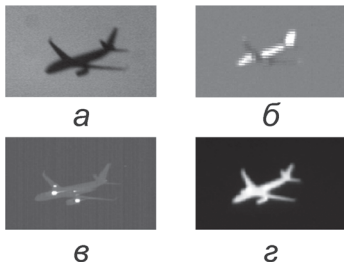


Рис. 2. Изображения самолета в разных диапазонах спектра:

а—г — спектральные диапазоны УФ, видимый, средний и дальний ИК, соответственно

фоне «небо» с облачностью 3 балла. Измерения проводили в дневное время. Исследования показали, что использование различных спектральных диапазонов позволяют создавать оптические сигнатуры типичных объектов независимо от подстилающих поверхностей с доверительной вероятностью 95 %.

Важным параметром ФЦО являются координаты центра объекта (x_0 , y_0) на изображении:

$$x_0 = \frac{1}{J} \iint_S xB(x, y) dx dy; \quad y_0 = \frac{1}{J} \iint_S yB(x, y) dx dy.$$

При использовании фотоприемной матрицы для координат центра объекта можно записать

$$x_0 = \Delta \delta \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n i \varphi_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varphi_{ij}; \quad y_0 = \Delta \delta \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n j \varphi_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varphi_{ij}, \quad (2)$$

где φ_{ij} — сигнал, соответствующий ij -му элементу фотоприемной матрицы, $m \times n$ — ее формат.

В (2) учитывают только сигналы, превышающие порог обнаружения φ_0 .

Основные показатели эффективности ОЭС наблюдения ФЦО в соответствии с их назначением: вероятность обнаружения и идентификации объекта на заданной дальности и среднее квадратическое отклонение оценки его координат. Распознавание — наиболее сложный процесс, поскольку он тесно связан с методами предварительной обработки изображений. Качество распознавания зависит от эффективности множества процессов, начиная от процесса ввода изображения и заканчивая формированием признаков (оптической сигнатуры) объекта [1, 10, 11].

Разработанный аппаратно-методический комплекс, обеспечивающий получение количественных характеристик ФЦО — энергетической яркости типовых объектов и фонов, распределения их энергетической яркости и силы излучения — может использоваться при создании многоспектраль-

ных ОЭС, в части информационного фоноцелевого обеспечения.

Л и т е р а т у р а

1. Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. СПб: БХВ-Петербург, 2011.
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Многоспектральные оптико-электронные системы // Специальная техника. 2002. № 4. С. 56—62.
3. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ, 2001.
4. Дмитриев Е. И., Степанов А. И. Оптический имитатор нагретых движущихся объектов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2005. С. 65—71.
5. Макаров А. С., Омелаев А. И., Филиппов В. Л. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем. Казань: Унипресс, 1998.
6. Cedip-infrared. [Электрон. ресурс] www.cedip-infrared.com; www.flir.com (дата обращения 13.01.2014 г.).
7. Hamamatsu. [Официальный сайт] www.hamamatsu.com (дата обращения 13.01.2014 г.).
8. Fastesimaging. [Официальный сайт] www.fastesimaging.com (дата обращения 13.01.2014 г.).
9. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники М.: Сов. радио, 1978.
10. Солдатов В. П. Сравнение двух способов локации целей с матричными приемниками излучения // Измерительная техника. 2005. № 12. С. 31—33; Soldatov V. P. Comparison of two methods of location of a target in devices with multi-element radiation detectors // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N. 12. P. 1191—1195.
11. Королев А. Н., Гарцуев А. И. Точность измерения координат изображения на ПЗС-матрице // Измерительная техника. 2004. № 5. С. 20—22; Korolev A. N., Gartsuev A. I. Precision of measurement of the coordinates of an image on a CCD matrix // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N. 5. P. 449—453.

Дата принятия 15.08.2014 г.