

УДК 621.396.624

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДИКАТРИСЫ ИЗЛУЧЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

С.А. ЛУКАШЕВИЧ, В.Н. УРЯДОВ, А.И. ПОДЛУЖНЫЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 18 ноября 2017

Предложена методика измерения и пересчета термографических изображений беспилотных летательных аппаратов в индикатрису излучения в инфракрасном диапазоне длин волн.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, беспилотный летательный аппарат, индикатриса, энергетические характеристики.

Введение

В последние годы стали часто применяться беспилотные летательные аппараты (БЛА), которые могут использоваться как для ведения воздушной разведки, так и для наблюдения, мониторинга, в том числе в военных целях. Основные отличия БЛА от пилотируемых летательных аппаратов (ЛА) заключаются в их малых размерах, низкой мощности двигателя и широком применении в процессе производства композитных материалов, что существенно осложняет их обнаружение имеющимися на вооружении средствами оптоэлектронных устройств (ОЭУ) инфракрасного диапазона (ИК). Таким образом, на данный момент существует необходимость проведения работ по измерению энергетической силы излучения БЛА и оценки возможности их обнаружения. Кроме этого, анализ индикатрис излучения позволит производителям БЛА разработать мероприятия по снижению заметности.

Обоснование методики измерений энергетических характеристик БЛА в ИК-диапазоне в статическом режиме

Основными источниками ИК-излучения БЛА являются его силовая установка и составные элементы (блок(-и) цилиндров, головка(-и) блока цилиндров (ГБЦ), система выпуска отработанных газов (ОГ)), а также струя выхлопных газов. Мероприятия, направленные на снижение ИК-излучения, могут привести к нежелательным изменениям летно-эксплуатационных характеристик БЛА, а также повлиять на боевую эффективность. Мероприятия по снижению инфракрасной заметности БЛА являются эффективными, в случае если они не изменяют тактико-технические характеристики ЛА при достижении заданных уровней ИК-излучения.

При проведении экспериментальных исследований БЛА устанавливается на поворотном устройстве (подвешивается на подъемном кране). Размеры площадки при этом должны позволять разместить измерительный прибор таким образом, чтобы исследуемый объект полностью попадал в поле его зрения. Для того чтобы исключить влияние фоновой засветки, измерения необходимо проводить либо в ясную погоду после захода солнца, либо в пасмурную погоду, но при условии отсутствия осадков или тумана. Измерения индикатрисы следует проводить в нескольких режимах работы силовой установки: форсажном, крейсерском и полетном малом газе. Для построения индикатрисы необходимо выбирать достаточное количество углов визирования и шаг их регулирования. Так как большинство головок

самонаведения управляемых ракет работают в диапазонах 1,8–3,2 мкм, 3,5–5,5 мкм, 6–14 мкм, то и измерения следует проводить в данных спектральных диапазонах. Измерения в ИК-диапазоне следует проводить в определенной последовательности.

1. Установка и фиксация БЛА в пространстве для достижения требуемых углов визирования.

2. Наведение измерительного прибора (тепловизора, радиометра) на объект измерения при помощи визирного устройства либо с учетом максимального принимаемого сигнала.

3. Измерение фонового ИК-излучения при неработающем двигателе. В случае применения радиометра (без возможности визуального наведения).

4. Вывод двигателя на необходимый режим и стабилизация его в течение заданного времени.

5. Измерение ИК-излучения прибором.

В ходе измерений необходимо также регистрировать температуру, относительную влажность, атмосферное давление воздуха, расстояние от измерительного прибора до объекта, угол визирования и азимут.

При проведении измерений тепловизорами необходимо преобразовать результат измерений полученных матриц температур (термограмм) в энергетические характеристики. На первом этапе преобразований необходимо вырезать из термограмм ячейки, которые не относятся к образу объекта исследования, с целью исключения влияний излучающих объектов, попавших в поле зрения измерительного прибора. После этого над матрицей температур можно производить преобразования по формулам Стефана-Больцмана или Планка [1].

После преобразования таблицы температур и вычитания фона следует рассчитать соответствующие энергетические характеристики.

$$M_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial S} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right], \quad (1)$$

где M_e – энергетическая светимость (поверхностная плотность потока энергии излучаемого площадкой), Φ_e – поток энергии, S – площадь излучающей площадки.

Энергетическая светимость может быть рассчитана по формуле Стефана-Больцмана для абсолютно черного тела (АЧТ):

$$M_e = \sigma T^4 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (2)$$

Так как измерения проводятся для серого тела, то в формулу Стефана-Больцмана вводится параметр ε – коэффициент излучения с учетом обратного преобразования. Для исключения влияния данного коэффициента необходимо при расчетах использовать значение, установленное в тепловизионном приборе при измерении термограмм. Кроме этого, необходимо рассчитывать поток излучения относительно фона, поэтому формула Стефана-Больцмана приобретает вид:

$$M_e = \varepsilon \sigma (T_{об}^4 - T_{сп}^4) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right], \quad (3)$$

где $T_{сп}$ – температура окружающей среды, $T_{об}$ – температура объекта.

С учетом того, что термограмма представляет собой набор пикселей с различными температурами, то для перехода от энергетической светимости к потоку излучения используются следующие выражения:

$$\Phi_e = M_e S [\text{Вт}], \quad (4)$$

$$\Phi_e = \varepsilon \sigma S_{пов} \sum_{i=1}^{N_{РЛХ}} \sum_{j=1}^{N_{РЛХ}} (T_{обij}^4 - T_{сп}^4) [\text{Вт}], \quad (5)$$

где $S_{пов}$ – площади проекции части воздушной цели на картинную плоскость, проходящую через центр масс БЛА) и регистрируемую одним пикселем тепловизора; $N_{РЛХ}$ – разрешающая

способность тепловизионного прибора по вертикали; N_{PIXX} – разрешающая способность тепловизионного прибора по горизонтали; $T_{обij}$ – температура пикселя с координатами i и j из термограммы в K .

$$S_{пов} = \frac{S_{FOV}}{R} [M^2], \quad (6)$$

где S_{FOV} – площадь картинной плоскости, регистрируемой полным полем зрения тепловизора; R – количество пикселей матрицы тепловизора.

$$S_{FOV} = 4d^2 \tan\left(\frac{\alpha_{FOVH}}{2}\right) \tan\left(\frac{\alpha_{FOVV}}{2}\right) [M^2], \quad (7)$$

где d – расстояние до картинной плоскости (объекта); α_{FOVH} – горизонтальный угол зрения тепловизора; α_{FOVV} – вертикальный угол зрения тепловизора.

$$R = N_{PIXY} N_{PIXX}, \quad (8)$$

где N_{PIXY} – разрешающая способность тепловизионного прибора по вертикали, N_{PIXX} – разрешающая способность тепловизионного прибора по горизонтали.

Тогда общее выражение для определения потока излучения, исходя из закона Стефана-Больцмана принимает вид:

$$\Phi_e = \varepsilon\sigma \frac{4d^2 \tan\left(\frac{\alpha_{FOVH}}{2}\right) \tan\left(\frac{\alpha_{FOVV}}{2}\right)}{N_{PIXY} N_{PIXX}} \sum_{i=1}^{N_{PIXY}} \sum_{j=1}^{N_{PIXX}} (T_{обij}^4 - T_{cp}^4) [Вт], \quad (9)$$

Энергетическая яркость показывает, как сильно излучает тело в заданном направлении. Это важная характеристика, поскольку при расчете теплообмена излучением приходится рассчитывать потоки от данной поверхности на другие тела, произвольно расположенные в пространстве. Большинство технических материалов с шероховатой, окисленной или «матовой» поверхностью являются так называемыми диффузными излучателями [2]: их энергетическая яркость не зависит от направления (угла Ψ). Для таких плоских излучателей, как показано ниже, энергетическая светимость M_e (по всем направлениям внутрь полусферы) связана с энергетической яркостью L соотношением [2]:

$$L = \frac{M_e}{\pi} \left[\frac{Вт}{Cp \times M^2} \right], \quad (10)$$

где M_e – плотность потока (энергетическая светимость) по всем направлениям внутрь полусферы. Следовательно, поток излучения в заданном направлении можно рассчитать следующим образом:

$$\Phi_e = \frac{M_e S}{\pi} d\omega \times \cos \psi \left[\frac{Вт}{Cp} \right], \quad (11)$$

$$\Phi_e = \frac{M_e S}{\pi} \left[\frac{Вт}{Cp} \right]. \quad (12)$$

Тогда энергетическая сила излучения в направлении перпендикулярном картинной плоскости [3]:

$$\Phi_e = \frac{\varepsilon\sigma}{\pi} \frac{4d^2 \tan\left(\frac{\alpha_{FOVH}}{2}\right) \tan\left(\frac{\alpha_{FOVV}}{2}\right)}{N_{PIXY} N_{PIXX}} \sum_{i=1}^{N_{PIXY}} \sum_{j=1}^{N_{PIXX}} (T_{обij}^4 - T_{cp}^4) \left[\frac{Вт}{Cp} \right], \quad (13)$$

Выражение (13) можно использовать для расчетов энергетических характеристик при проведении косвенных измерений.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились для оценки возможности использования измерительных тепловизоров с целью получения индикатрисы излучения БЛА с двухтактным четырехцилиндровым двигателем внутреннего сгорания и дальнейшего построения индикатрисы излучения в ИК-диапазоне.

Тестовая термограмма сделана при угле визирования 0° и азимуте 180° (рис. 1).



Рис. 1. Тестовая термограмма БЛА (угол визирования – 0° , азимут – 180°)

Предварительный расчет энергетической светимости БЛА произведен для азимута 90° и угла визирования 0° . При проведении основных измерений, расчет будет выполнен для сферы (полусферы) с дискретностью углов места и азимутов, равными 15° . Энергетическая сила излучения для данной термограммы, исходя из выражения (13), в этом случае будет равна:

$$\Phi_e = 4,652 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{Ср}} \right].$$

Заключение

Предложенная методика позволяет измерять энергетические характеристики БЛА косвенным методом, что подтверждено теоретическими расчетами и экспериментальными исследованиями. При статических измерениях с различными углами визирования и азимутами, возможно получить индикатрису ИК-излучения для БЛА в сфере либо полусфере, посредством которой можно определить энергетический поток, попадающий на линзу головки самонаведения, в зависимости от расстояния, угла визирования, азимута и затухания в атмосфере.

MEASUREMENT OF IR RADIATION INDICATRIX OF DRONES

S.A. LUKASHEVICH, V.N. URJADOV, A.N. PODLUZHNIY

Abstract

Methodic of measurement and calculation of drone's thermographic images to indicatrix of radiation in infrared wavelength range is proposed.

Keywords: infrared radiation, drone, indicatrix, energy characteristic.

Список литературы

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 2003.
2. Солодов А.П. Тепломассообмен в энергетических установках. Инженерные методы расчета. М., 2015.
3. User's manual FLIR. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://panelmeters.weschler.com/Asset/Flir-I-series-user-manual.pdf>.