



Метод оценки пространственной структуры излучения беспилотных воздушных судов

Ю. И. Якименко, С. П. Астахов, И. В. Якименко
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске,
Смоленск, Россия

Предложен метод оценки пространственных структур излучения беспилотных воздушных судов, позволяющий получать приближенные математические модели их пространственной структуры излучения, которые могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки эффективности решения задач обнаружения беспилотных воздушных судов с помощью пассивных оптико-электронных систем.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, пассивная оптико-электронная система, атмосферный фон, поле зрения

Статья получена: 30.05.2023

Статья принята: 10.07.2023

ВВЕДЕНИЕ

Современные беспилотные воздушные суда (БВС) выполняют широкий спектр задач: наблюдение (разведка), нанесение ударов, транспортировка грузов, выдача целеуказаний средствам поражения, ретрансляции данных и т. д. Вследствие этого возникает необходимость в организации противодействия БВС, потенциально создающим угрозы военным, промышленным и техногенным объектам. Для обеспечения этого необходимо прежде всего повышать эффективность обнаружения: так как малые величины эффективных площадей рассеяния (ЭПР) БВС лишают возможности применять активные радиолокационные средства в интересах их обнаружения, то альтернативой может стать применение пассивных оптико-электронных систем (ПОЭС).

Estimation Method for the Spatial Radiation Structure of Unmanned Aerial Vehicles

Yu. I. Yakimenko, S. P. Astakhov, I. V. Yakymenko
Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Smolensk, Russia

The estimation method for the spatial radiation structures of unmanned aerial vehicles is proposed that allows obtaining the approximate mathematical models of their spatial radiation structure. Such models can be used as the initial data for efficiency evaluation of problem solution related to the detection of unmanned aerial vehicles using the passive optoelectronic systems.

Keywords: unmanned aerial vehicle, passive optoelectronic system, atmospheric background, field of view

Article received: 30.05.2023

Article accepted: 10.07.2023

INTRODUCTION

The up-to-date unmanned aerial vehicles (UAVs) perform a wide range of tasks: surveillance (reconnaissance), strikes, transportation of goods, target designation for weapons, data broadcasting, etc. As a result, there is a need to arrange the countering activities against the UAVs that potentially create threats to the military, industrial and man-made facilities. To ensure this, it is necessary, first of all, to increase the detection efficiency. Since the small values of the UAV scattering cross-sections (SCS) make it impossible to use the active radar equipment for its detection, the use of passive optoelectronic systems (POES) can become an alternative option.

It is proposed to assess the POES application efficiency by the detection range value of UAVs for a given detection probability. To assess the performance indicators of POES functioning for UAV detection, infor-



Эффективность использования ПОЭС предлагается оценивать величиной дальности обнаружения с их помощью БВС при заданном значении вероятности обнаружения. Для оценки показателей эффективности функционирования ПОЭС в интересах обнаружения БВС необходима информация об особенностях БВС как источниках (ретрансляторах) оптического излучения и характере пространственного распределения излучения различных атмосферных фонов (АФ). Методы и результаты оценки пространственных характеристик излучения АФ достаточно подробно приведены в ряде источников, например [1-3], тогда как информация об особенностях БВС как источниках (ретрансляторах) оптического излучения.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Известны несколько методов определения пространственной структуры излучения летательных аппаратов (ЛА), в том числе и БВС:

- измерение энергетической яркости ЛА в процессе его полета по заданным траекториям. Этот метод позволяет получать информацию о параметрах излучения ЛА преимущественно в нижнюю полусферу и ограниченных секторах. Кроме этого, для проведения таких исследований необходимо сложное и дорогостоящее оборудование.
- измерение энергетической яркости размещенного на стенде неподвижного ЛА с работающей двигательной установкой [4]. В этом случае измерение энергетической яркости проводится таким образом, что измерительная аппаратура перемещается вокруг ЛА по окружности. К недостаткам метода следует отнести то, что практически полностью исключается влияние излучения, обусловленное аэродинамическим нагревом (или охлаждением) элементов планера ЛА. Кроме того, в этом случае, возможно, получить индикатрису излучения ЛА только в горизонтальной плоскости, в то время как для наблюдателя ЛА требуется информация, о характере излучения в нижнюю полусферу.
- определение пространственной структуры излучения ЛА на основании расчетов [5]. К недостаткам этого метода следует отнести приближенность и ограниченный объем полученных результатов.

information is required related to the UAV features as the source (boosters) of optical radiation and nature of the spatial radiation distribution from various atmospheric backgrounds (AB). The estimation methods and results for the spatial AB radiation specifications are provided in detail in a number of sources, for example, [1-3], while information about the features of UAVs as the sources (boosters) of optical radiation.

AVAILABLE EVALUATION METHODS FOR THE SPATIAL RADIATION STRUCTURES OF AERIAL VEHICLES

There are several methods to determine the spatial radiation structure of aerial vehicles (AVs), including the UAVs:

- radiance measurement of the aircraft during its flight along the specified trajectories. This method makes it possible to obtain information about the AV radiation parameters mainly to the lower hemisphere and limited sectors. Moreover, such studies require the comprehensive and expensive equipment.
- radiance measurement of a stationary AV with an active propulsion system placed on the bench [4]. In this case, the radiance measurement is performed in such a way that the measuring equipment is moving around the aircraft in a circular motion. The disadvantages of the method include the fact that the radiation effect due to the aerodynamic heating (or cooling) of the aircraft airframe elements is almost completely eliminated. In addition, in this case, it is possible to obtain the indicatrix of the AV radiation only in the horizontal plane, while the AV observer requires information relating to the radiation type into the lower hemisphere.
- determination of the spatial structure of the AV radiation based on calculations [5]. The disadvantages of this method include approximation and the limited scope of the results obtained.

DEVELOPED EVALUATION METHOD FOR THE SPATIAL RADIATION STRUCTURE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

The main feature of the developed method for estimating the spatial radiation structure is that the UAV under study is fixed in a specially designed rotary device with two degrees of freedom (Fig. 1) that provides a change in the UAV angular position in terms of the yaw angle (ψ) and roll angle (γ) in various operating modes of the propulsion system. Measurements of the UAV radiation strength are made using a measur-

РАЗРАБОТАННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Основной особенностью разработанного метода оценки пространственной структуры излучения является то, что исследуемое БВС фиксируется в специально разработанном поворотном устройстве с двумя степенями свободы (рис. 1), обеспечивающем изменение углового положения БВС в пространстве по углу рысканья (ψ) и углу крена (γ) при различных режимах работы двигательной установки. Измерения силы излучения БВС производятся при помощи измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) в различные времена суток и года при различных метеословиях, которые фиксируются с помощью переносной метеостанции.

Радиометр из состава ИВК устанавливается на штатив, позволяющий направлять оптическую ось радиометра на БВС (рис. 1), причем расстояние D между радиометром и БВС выбирается таким образом, чтобы в поле зрения радиометра вписывались все возможные проекции БВС, что контролируется с помощью оптического визира.

Диаметр окружности d (поле зрения радиометра) зависит от расстояния D между радиометром и БВС и определяется по формуле:

$$d = 2D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\delta\theta}{2}\right), \quad (1)$$

где D – расстояния D между радиометром и БВС,
 d – диаметр поля зрения радиометра,
 $\delta\theta$ – угол поля зрения радиометра.

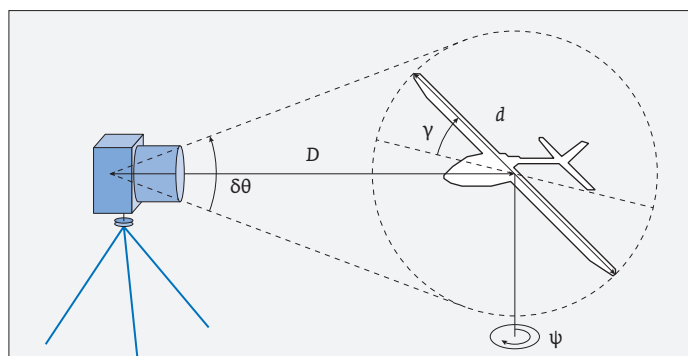


Рис. 1. Схема проведения измерений энергетической яркости БВС: радиометр на штативе и поворотное устройство с двумя степенями свободы

Fig. 1. UAV radiance measurement diagram: a radiometer on a tripod and a rotary device with two degrees of freedom.

ing and computing complex (MCC) at various times of the day and year under various weather conditions to be recorded using a portable meteorologic station.

The radiometer from the MCC is mounted on a tripod that makes it possible to direct the radiometer optical axis to the UAV (Fig. 1), and the distance D between the radiometer and the UAV is selected so that all possible UAV views correspond to the field of view of the radiometer that is controlled using an optical viewer.

The diameter of circle d (field of view of the radiometer) depends on the distance D between the radiometer and the UAV and is determined by the following formula:

$$d = 2D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\delta\theta}{2}\right), \quad (1)$$

where D are the distances D between the radiometer and the UAV,

d is the diameter of the field of view of the radiometer,

$\delta\theta$ is the angle of the field of view of the radiometer.

The multichannel radiometer has the following parameters:

- working spectral ranges: 1.5–2 microns, 3–5 microns and 8–13 microns,
- field of view width $\delta\theta = 24'$.

Since the radiometer receives a mixture of background and UAV radiation $B_{\text{fUAV}}(\gamma, \psi)$, the useful information, i. e., the radiance value $B_{\text{UAV}}(\gamma, \psi)$ is obtained in accordance with the algorithm by subtracting from $B_{\text{fUAV}}(\gamma, \psi)$ any radiance values of the background area screened by the UAV glider: $B_{\text{r}}(\gamma, \psi) \cdot k_{\text{p}}(\gamma, \psi)$ (Fig. 2).

The current background parameters are determined immediately after the UAV radiance measurements using the same radiometer.

The UAS overlap factor of the radiometer field of view is determined on the basis of the following formula:

$$k_{\text{p}}(\gamma, \psi) = \frac{S_{\text{p}} - S_{\text{pr}}(\gamma, \psi)}{S_{\text{p}}}, \quad (2)$$

where $S_{\text{pr}}(\gamma, \psi)$ is the UAV projection area on the image plane that is perpendicular to the direction of sighting, at different observation angles.

S_{p} is the area of the radiometer field of view at a distance D , determined by the following formula:

$$S_{\text{p}} = \frac{\pi d^2}{4} = \pi \cdot D^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\delta\theta}{2}. \quad (3)$$

Многоканальный радиометр обладает следующими параметрами:

- рабочие спектральные диапазоны: 1,5–2 мкм, 3–5 мкм и 8–13 мкм,
- ширина поля зрения $\delta\theta = 24'$.

Так как на радиометр поступает смесь излучения фона и БВС $B_{\text{ФБВС}}(\gamma, \psi)$, выделение полезной информации, т.е. величины энергетической яркости $B_{\text{ФБВС}}(\gamma, \psi)$, осуществляется в соответствии с алгоритмом, путем вычитания из $B_{\text{ФБВС}}(\gamma, \psi)$ величины энергетической яркости участка фона экранируемого планером БВС: $B_{\text{Ф}}(\gamma, \psi) \cdot k_{\text{П}}(\gamma, \psi)$ (рис. 2).

Текущие параметры фона определяются сразу же после проведения измерений энергетической яркости БВС с помощью того же радиометра.

Коэффициент перекрытия БВС поля зрения радиометра определяется из выражения:

$$k_{\text{П}}(\gamma, \psi) = \frac{S_{\text{П}} - S_{\text{ПР}}(\gamma, \psi)}{S_{\text{П}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ПР}}(\gamma, \psi)$ – площадь проекции БВС на картинную плоскость, перпендикулярную направлению визирования, при различных ракурсах наблюдения.

$S_{\text{П}}$ – площадь поля зрения радиометра на дальности D , определяемая по формуле:

$$S_{\text{П}} = \frac{\pi d^2}{4} = \pi \cdot D^2 \cdot \text{tg}^2 \frac{\delta\theta}{2}. \quad (3)$$

Энергетическая яркость фона (при наличии БВС) в поле зрения радиометра $B'_{\text{Ф}}(\gamma, \psi)$ рассчитывается по формуле:

$$B'_{\text{Ф}}(\gamma, \psi) = B_{\text{Ф}}(\gamma, \psi) \cdot k_{\text{П}}(\gamma, \psi), \quad (4)$$

где $B_{\text{Ф}}(\gamma, \psi)$ – энергетическая яркость текущего фона (при отсутствии БВС).

При известной фоновой составляющей излучения энергетическая яркость БВС по отношению к фону:

$$B_{\text{БВС}}(\gamma, \psi) = B_{\text{ФБВС}}(\gamma, \psi) - B'_{\text{Ф}}(\gamma, \psi). \quad (5)$$

В случае наблюдения БВС на большой дальности (в виде точечного источника излучения), его следует характеризовать не энергетической яркостью, а силой излучения.

Поток излучения (лучистый поток), создаваемый излучением БВС $F(\gamma, \psi)$, связан с измеряемой в точке наблюдения энергетической яркостью $B_{\text{БВС}}(\gamma, \psi)$ зависимостью:

$$F(\gamma, \psi) = B_{\text{БВС}}(\gamma, \psi) \cdot S_{\text{П}}(\gamma, \psi) \cdot \Omega, \quad (6)$$

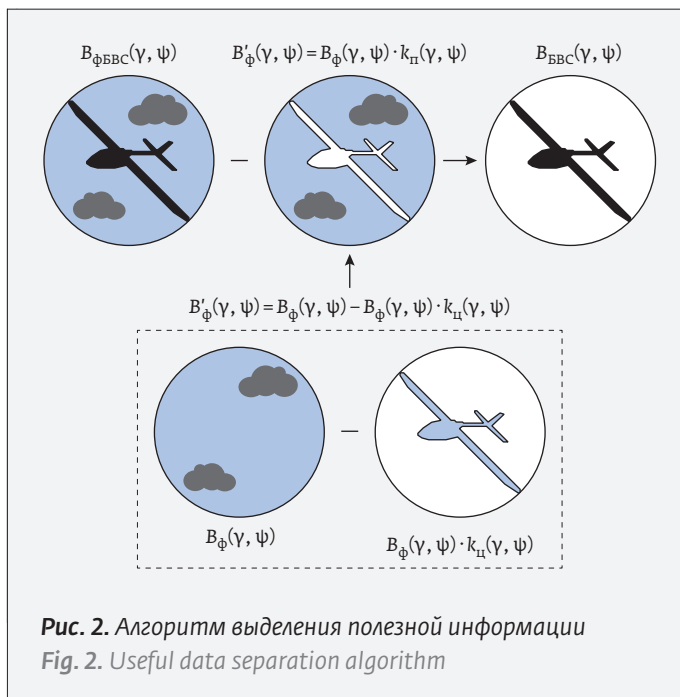


Рис. 2. Алгоритм выделения полезной информации
Fig. 2. Useful data separation algorithm

The background radiance (in the presence of an UAV) in the radiometer field of view $B'_f(\gamma, \psi)$ is calculated by the following formula:

$$B'_f(\gamma, \psi) = B_f(\gamma, \psi) \cdot k_p(\gamma, \psi), \quad (4)$$

where $B_f(\gamma, \psi)$ is the radiance of the current background (in the absence of UAV).

With a well-known background component of the radiation, the UAV radiance in relation to the background is as follows:

$$B_{\text{UAV}}(\gamma, \psi) = B_{\text{fUAV}}(\gamma, \psi) - B'_f(\gamma, \psi). \quad (5)$$

In the case of UAV observation at a long distance (in the form of a point source of radiation), it should be specified not by the radiance, but by the radiation intensity.

The radiation flux (luminous flux) generated by the UAV radiation $F(\gamma, \psi)$ is related to the radiance $B_{\text{UAV}}(\gamma, \psi)$ measured at the point of observance with the following dependence:

$$F(\gamma, \psi) = B_{\text{UAV}}(\gamma, \psi) \cdot S_p(\gamma, \psi) \cdot \Omega, \quad (6)$$

where Ω is the solid angle occupied by the radiometer field of view, av.

In addition, the luminous flux can be shown in terms of the radiation intensity:

$$F(\gamma, \psi) = \frac{J_{\text{UAV}}(\gamma, \psi) \cdot S_{\text{av}} \cdot \Omega \cdot \tau_a}{D^2}, \quad (7)$$

где Ω – телесный угол, занимаемый полем зрения радиометра, ср.

Кроме того, лучистый поток может быть выражен через силу излучения:

$$F(\gamma, \psi) = \frac{J_{\text{БВС}}(\gamma, \psi) \cdot S_{\text{об}} \cdot \Omega \cdot \tau_a}{D^2}, \quad (7)$$

где $J_{\text{БВС}}(\gamma, \psi)$ – сила излучения БВС в зависимости от угла наблюдения,

τ_a – коэффициент пропускания атмосферы для метеоситуации, соответствующей условиям измерения,

$S_{\text{об}}$ – площадь входной апертуры радиометра.

Приравняв выражения (6) и (7), можно выразить силу излучения БВС через результаты наблюдаемой энергетической яркости:

$$J_{\text{БВС}}(\gamma, \psi) = \frac{B_{\text{БВС}}(\gamma, \psi) \cdot S_{\text{п}}(\gamma, \psi) \cdot D^2}{S_{\text{об}} \cdot \tau_a} = \frac{(B_{\text{ФБВС}}(\gamma, \psi) - B_{\text{БВС}}(\gamma, \psi) \cdot k_{\text{п}}(\gamma, \psi)) \cdot S_{\text{п}}(\gamma, \psi) \cdot D^2}{S_{\text{об}} \cdot \tau_a}. \quad (8)$$

Таким образом, для реализации процедуры вычислений по формулам (4–8) необходимо определить коэффициент перекрытия фона и площади проекции на картинную плоскость БВС как функций его пространственного положения от ψ и от γ . Поскольку БВС различных типов отличаются по конфигурации, эту задачу следует решать для каждого случая отдельно.

Величина коэффициента перекрытия БВС поля зрения радиометра $k_{\text{п}}(\gamma, \psi)$ определяется натурным моделированием для исследуемого класса БВС, с помощью поворотного устройства и цифровой фотокамеры:

- в поворотном устройстве с двумя степенями свободы закрепляется БВС (рис. 3),
- цифровая фотокамера размещается на фиксированном удалении от поворотного устройства с БВС,
- фотофиксация БВС производится на фоне экрана белого цвета размером $L_{\text{в}} \times L_{\text{г}}$ при изменении значений ψ от 0 до 360° через каждые 10° при фиксированном значении γ , значение которого после полного оборота по ψ изменяется от -180° до 180° через 10°,
- полученные в процессе фотофиксации кадры обрабатываются (удаляется фон в редакторе изображений в интересах повышения контрастности изображения БВС),
- проводится бинаризация полученных изображений на основе пороговой обработки (рис. 4).

where $J_{\text{UAV}}(\gamma, \psi)$ is the UAV radiation intensity depending on the observation angle,

τ_a is the atmospheric transmissivity for the meteorological situation relevant to the measurement conditions,

$S_{\text{ав}}$ is the area of the input aperture of the radiometer.

By equating the expressions (6) and (7), we can indicate the UAV radiation intensity through the results of the observed radiance:

$$J_{\text{UAV}}(\gamma, \psi) = \frac{B_{\text{UAV}}(\gamma, \psi) \cdot S_{\text{п}}(\gamma, \psi) \cdot D^2}{S_{\text{ав}} \cdot \tau_a} = \frac{(B_{\text{ФUAV}}(\gamma, \psi) - B_{\text{UAV}}(\gamma, \psi) \cdot k_{\text{п}}(\gamma, \psi)) \cdot S_{\text{п}}(\gamma, \psi) \cdot D^2}{S_{\text{ав}} \cdot \tau_a}. \quad (8)$$

Thus, in order to implement the calculation procedure using the formulas (4–8), it is necessary to determine the background overlap factor and the area of projection onto the UAV image plane as the functions of its spatial position from ψ and from γ . Since the UAVs of various types have different configurations, this issue should be solved for each case separately.

The value of the UAS overlap factor of the radiometer field of view $k_{\text{п}}(\gamma, \psi)$ is determined by the full-scale modeling for the UAV class under study, using a rotary device and a digital camera:

- the UAV is fixed in the rotary device with two degrees of freedom (Fig. 3),
- a digital camera is placed at a fixed distance from the rotary device with UAV,
- photographic fixation of the UAV is performed against a white screen with the dimensions of $L_{\text{h}} \times L_{\text{d}}$ when the values of ψ are changed from 0 to 360° every 10° at a fixed value of γ , the value of

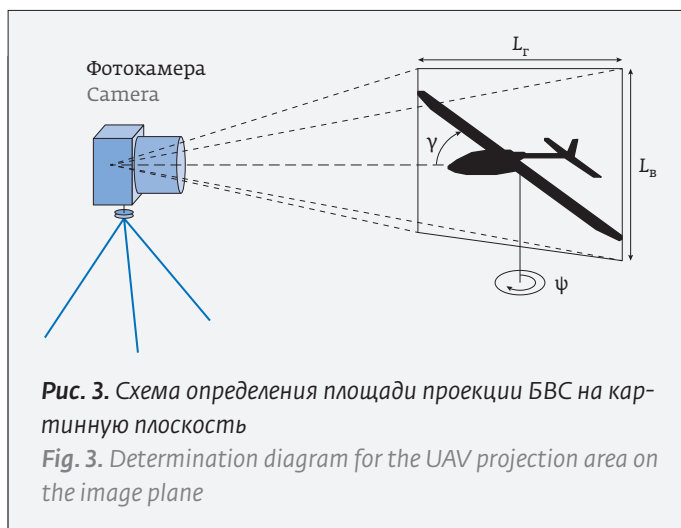


Рис. 3. Схема определения площади проекции БВС на картинную плоскость

Fig. 3. Determination diagram for the UAV projection area on the image plane



Рис. 4. Пример результата бинаризации изображения БВС на основе пороговой обработки
Fig. 4. An example of the UAV image binarization result based on thresholding

Пороговая обработка позволяет разделить множество пикселей изображения на два подмножества: содержащее изображение фона и содержащее изображение БВС. Очищенные от фона кадры изображений БВС использовались для определения коэффициента перекрытия БВС поля зрения радиометра $k_p(\gamma, \psi)$ при различных ракурсах.

Подсчет количества пикселей с единичным значением $N_1(\gamma, \psi)$ (пиксели фона) и с нулевым – $N_0(\gamma, \psi)$ (пиксели цели) позволил рассчитать коэффициент перекрытия при заданном ракурсе цели. Для этого в выражении (2) величина S_p заменяется на количество пикселей в бинарном изображении N :

$$N = N_1(\gamma, \psi) + N_0(\gamma, \psi).$$

Тогда:

$$k_p(\gamma, \psi) = \frac{N - N_0(\gamma, \psi)}{N} = 1 - \frac{N_0(\gamma, \psi)}{N} = 1 - k_c(\gamma, \psi), \quad (9)$$

где $k_c(\gamma, \psi)$ – коэффициент участия в излучении цели.

which is changed from -180° to 180° at an increment of 10° after a full rotation ψ ,

- the frames obtained during the photographic fixation process are processed (the background is removed in the image editor in order to increase the UAV image contrast),
- the obtained images are binarized based on the thresholding (Fig. 4).

Thresholding allows to divide the set of image pixels into two subsets: one containing the background image and one containing the UAV image. The background-cleared frames of the UAV images are used to determine the UAV overlap factor of the radiometer field of view $k_p(\gamma, \psi)$ at different angles.

Counting of the number of pixels with a unit value $N_1(\gamma, \psi)$ (background pixels) and with a zero value $N_0(\gamma, \psi)$ (target pixels) makes it possible to calculate the overlap factor for a given target angle. For this purpose, in the expression (2) the value S_p is replaced by the number of pixels in the binary image N :

$$N = N_1(\gamma, \psi) + N_0(\gamma, \psi).$$

Then:

$$k_p(\gamma, \psi) = \frac{N - N_0(\gamma, \psi)}{N} = 1 - \frac{N_0(\gamma, \psi)}{N} = 1 - k_c(\gamma, \psi), \quad (9)$$

where $k_c(\gamma, \psi)$ is the coefficient of participation in the target radiation.

An example of the dependence of the overlap factor on the UAV angle $k_p(\gamma, \psi)$ is shown in Fig. 5.

The UAV projection area $S_{pr}(\gamma, \psi)$ onto the image plane, at different angles, was determined by the following formula:

$$S_{pr}(\gamma, \psi) = S_{kp} \cdot k_{UAV}(\gamma, \psi), \quad (10)$$

$$S_{kp} = L_d \cdot L_h,$$

ИНФРАКРАСНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ И ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Иммерсионные фотодиоды $\lambda=3\div 10$ мкм
 Матричные фотоприемники $\lambda=3\div 6$ мкм
 ИК детектирующие модули
 Светодиоды $\lambda=3\div 7$ мкм

Газовые сенсоры (метан, СnНm, углекислый газ, угарный газ)
 Драйверы для светодиодов
 Предусилители для фотодиодов



www.ioffeled.com

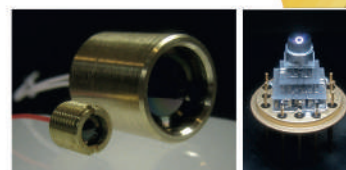
ПРИМЕНЕНИЯ

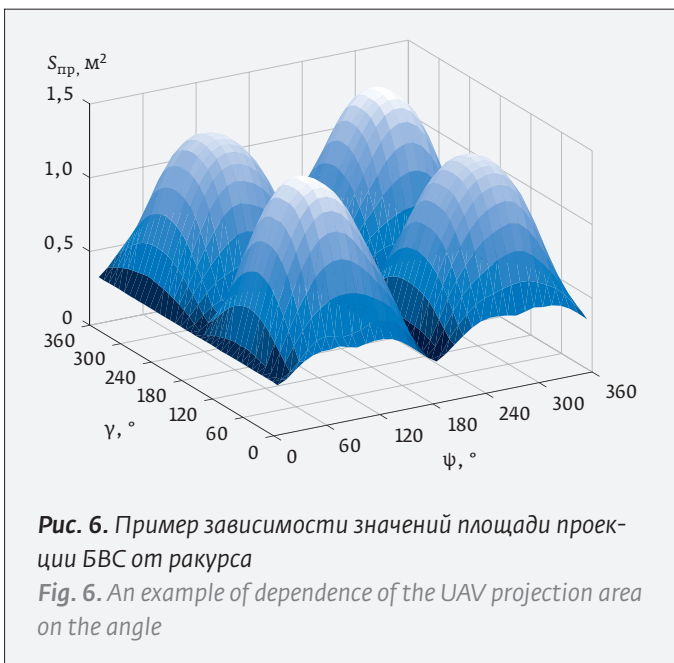
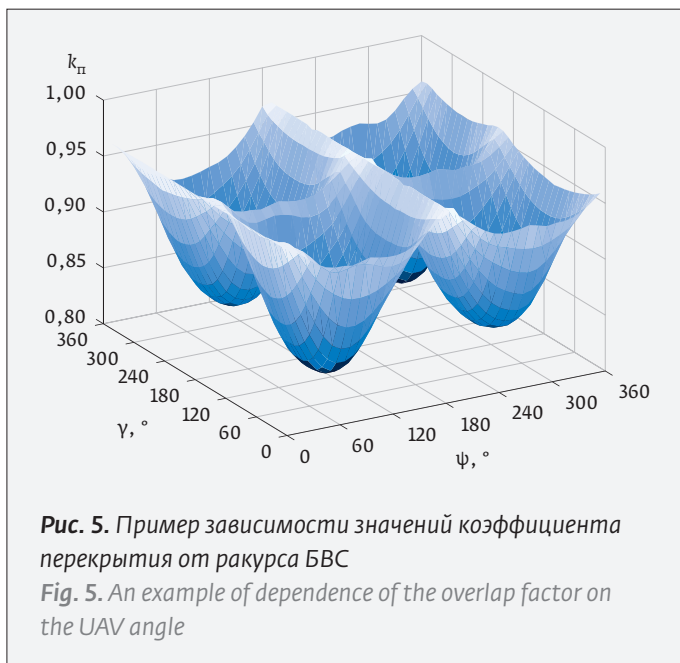
Приборы газового анализа:
 Портативные газоанализаторы
 Алкотестеры
 Капнографы (датчики CO2)
 Теплопеленгация
 Низкотемпературная пирометрия
 Тестирование тепловизионных систем

ПРЕИМУЩЕСТВА

Низкое энергопотребление (светодиоды): ≤ 0.1 Вт
 Фотовольтаический режим работы (фотодиоды)
 Быстродействие: десятки наносекунд
 Работа в непрерывном режиме (CW)
 Срок службы: $> 100\,000$ ч.
 Температура эксплуатации: $-60^\circ\text{C} \div +120^\circ\text{C}$

ООО «ИюффеЛЕД», Санкт-Петербург, e-mail: Mremenny@mail.ioffe.ru





Пример зависимости значений коэффициента перекрытия от ракурса БВС $k_p(\gamma, \psi)$ показан на рис. 5.

Площадь проекции БВС $S_{pp}(\gamma, \psi)$ на картинную плоскость при различных ракурсах определялась по формуле:

$$S_{pp}(\gamma, \psi) = S_{кп} \cdot k_{БВС}(\gamma, \psi), \quad (10)$$

$$S_{кп} = L_T \cdot L_B,$$

$$k_{БВС}(\gamma, \psi) = 1 - k_p(\gamma, \psi),$$

где L_T – горизонтальный размер экрана в картинной плоскости при проекции на нее БВС,
 L_B – вертикальный размер экрана в картинной плоскости при проекции на нее БВС.

Пример зависимости значений площади проекции БВС на картинную плоскость при различных ракурсах показан на рис. 6. Примеры полученных с помощью (8) значений $J_{БВС}(\gamma, \psi)$ в виде нормированных индикатрис показаны на рис. 7–9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

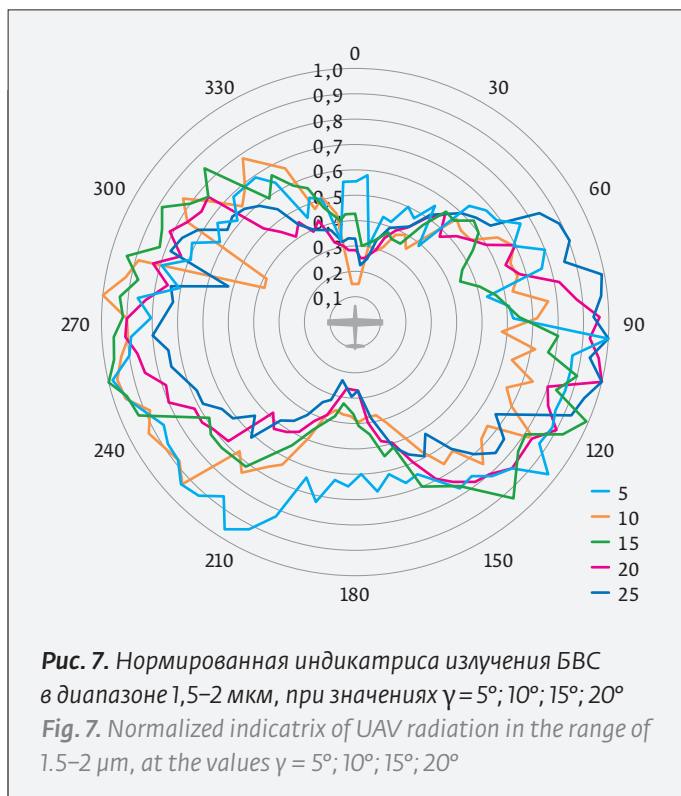
Предложен метод получения приближенных математических моделей пространственной структуры излучения БВС, которые могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки эффективности решения задач обнаружения БВС с помощью ПОЭС.

Анализ форм нормированных индикатрис излучения БВС показывает, что:

- в спектральном диапазоне 1,5–2 мкм при фиксированных углах крена наблюдается флук-

$$K_{UAV}(\gamma, \psi) = 1 - k_p(\gamma, \psi),$$

where L_d – the horizontal size of the screen in the image plane when the UAV is projected onto it;
 L_h – the vertical size of the screen in the image plane when the UAV is projected onto it.



туации уровней силы излучения (рис. 7), обусловленные изменением яркости отраженного солнечного излучения от планера БВС и, возможно, возникновения в отдельных случаях «отрицательного» контраста как результат экранирования отраженного солнечного излучения от облаков. Наблюдаемая асимметричность формы индикатрис излучения проявляется в увеличении силы излучения слева, что объясняется влиянием излучения Солнца в ходе измерений,

- в спектральных диапазонах 3–5 мкм и 8–13 мкм (рис. 8, 9) флуктуация уровней силы излучения незначительны, поскольку в них присутствует в основном собственное излучение БВС. Наблюдаемая асимметричность формы индикатрис излучения БВС обусловлена особенностями конструктивного исполнения его двигательной установки.

REFERENCES

1. **Yakimenko I.V.** *Metody, modeli i sredstva obnaruzheniya vozdushnykh celej na atmosfernom fone shirokougol'nymi optiko-elektronnyimi sistemami.* – S-Peterburg: Izdatel'stvo «Lan'». 2022. 16 pp. Якименко И. В. *Методы, модели и средства обнаружения воздушных целей на атмосферном фоне широкоугольными оптико-электронными системами.* – С.-Петербург: Издательство «Лань». 2022. 168 с.
2. **Mishchenko A.M., Mishchenko A.M., Rachkovskij S.S., Smolin V.A., Yakimenko I.V.**

An example of dependence of the UAV projection area on the image plane at different angles is shown in Fig. 6. The examples of values of $J_{UAV}(\gamma, \psi)$ obtained using the formula (8) in the form of normalized indicatrices are shown in Fig. 7–9.

CONCLUSION

A method is proposed for obtaining the approximate mathematical models of the spatial UAV radiation structure that can be used as the input data for efficiency evaluation of solving the UAV detection issues using the POES.

An analysis of the normalized indicatrix shapes of the UAV radiation demonstrates the following:

- in the spectral range of 1.5–2 μm at fixed roll angles, the fluctuations in the levels of radiation intensity are noted (Fig. 7), due to the changes in the brightness of the reflected solar radiation from the UAV glider and, possibly, occurrence in some cases of a “negative” contrast as a result of screening of the reflected solar radiation from the clouds. The observed asymmetry of the radiation indicatrix shapes is shown as an increase in the radiation intensity from the left that is explained by the solar radiation influence during measurements,

ВЫСОКОНАДЕЖНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ



НПК ЭОМС
научно-производственный
комплекс

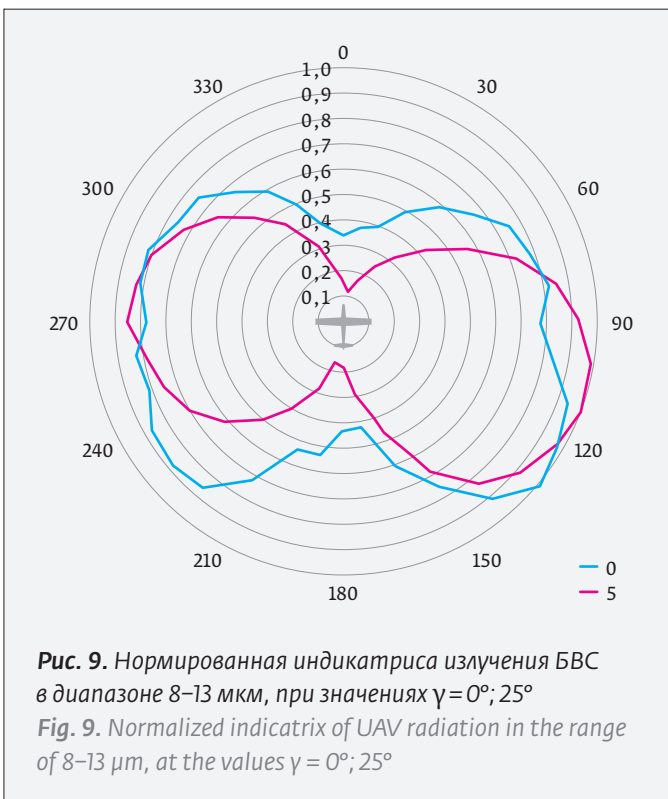
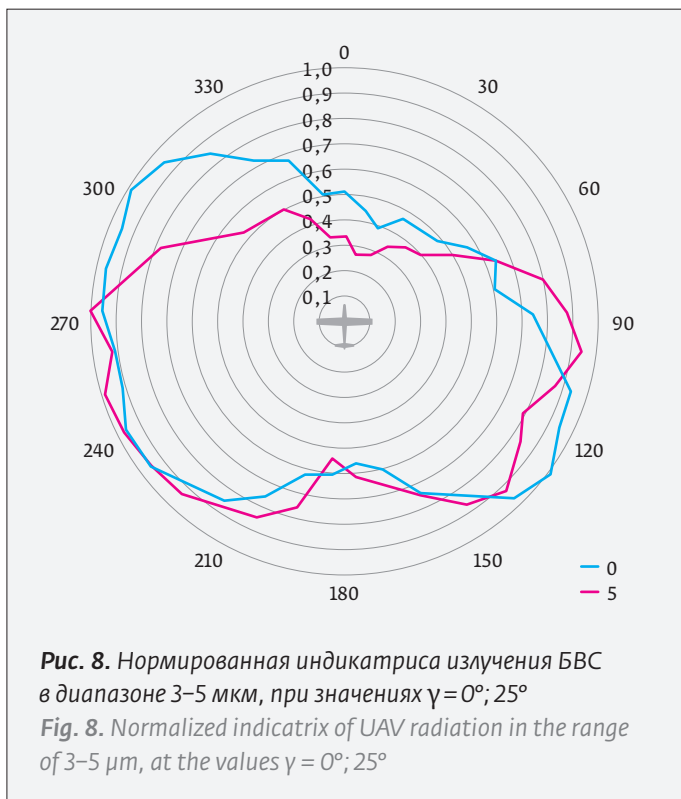


SALES@NPK-EOMS.RU
+7 499 290 28 60

СВЧ-МОДУЛИ
ТРАНЗИСТОРЫ
СВЧ-МИКРОСХЕМЫ
ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ
КОММУТАТОРЫ СВЧ-СИГНАЛОВ







Rezultaty issledovaniy prostranstvennoy struktury izlucheniya atmosfery v spektral'nom diapazone 1,5–2 mkm. *Svetotekhnika*. 2018;1: 40–44.

Мищенко А. М., Мищенко А. М., Рачковский С. С., Смолин В. А., Якименко И. В. Результаты исследований пространственной структуры излучения атмосферы в спектральном диапазоне 1,5–2 мкм. *Светотехника*. 2018;1: 40–44.

3. Yakimenko I. V., Mishchenko A. M. et al. Results of spatial structure of atmosphere radiation in a spectral range (1.5–2) μm research. *Light & Engineering*. 2018;26(3):7–13.

4. Lukashovich S. A., Uryadov V. N., Podluzhnyy A. I. Izmerenie indikatrissy izlucheniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v staticheskom rezhime. Sbornik mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminarra «Telekommunikacii: seti i tekhnologii, algebraicheskoe kodirovaniye i bezopasnost' dannykh». Part 1. Belorusskij gosudarstvennyy universitet informatiki i radioelektroniki. 2017;14–18. ISBN 978-985-543-312-6 (p. 1).
 Лукашевич С. А., Урядов В. Н., Подлужный А. И. Измерение индикатрисы излучения беспилотных летательных аппаратов в статическом режиме. Сборник международного научно-технического семинара «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных». Часть 1. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. 2017;14–18. ISBN 978-985-543-312-6 (ч. 1).

5. Poltavskij A. V., Zhumabaeva A. S., Yurkov N. K. Algoritm opredeleniya indikatrissy izlucheniya podvizhnogo ob'ekta na primere robototekhnicheskogo kompleksa bespilotnogo letatel'nogo apparata. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*. 2015; 3(11):23–30.
 Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примере робототехнического комплекса беспилотного летательного аппарата. *Надежность и качество сложных систем*. 2015; 3(11):23–30.

АВТОРЫ

Якименко Игорь Владимирович, д. т. н., доц., филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, Россия. ORCID 0000-0002-1003-8403

Астахов Сергей Петрович, к. т. н., доц., филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, Россия.

Якименко Юрий Игоревич, асп., филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, Россия. ORCID 0009-0001-2631-5997

• in the spectral ranges of 3–5 μm and 8–13 μm (Fig. 8, 9), the fluctuations in the radiation intensity levels are insignificant, since they mainly contain the UAV own radiation. The observed asymmetry of the UAV radiation indicatrix shapes is due to the design peculiarities of its propulsion system.

AUTHORS

Yakimenko Igor Vladimirovich, Dr. of Sc.(Engin.), associate professor, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk, Smolensk, Russia. ORCID 0000-0002-1003-8403

Astakhov Sergey Petrovich, Cand. of Sc.(Engin.), associate professor, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk, Smolensk, Russia.

Yakimenko Yury Igorevich, post-graduate student, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk, Smolensk, Russia. ORCID 0009-0001-2631-5997

CONFLICT OF INTEREST

The authors confirm the absence of a conflict of interest, all the authors have reviewed the final version of the manuscript and agreed on it after making some corrections.



РОССИЙСКИЙ ФОРУМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023

📍 Федеральная территория «Сириус»

📅 9–14 октября 2023

6
дней

1700
участников

665
предприятий-
участников

13
секций

74
экспозиции



Подписывайтесь, и будьте в курсе
всех последних новостей!

+7 495 641 57 17

microelectronica.pro

info@microelectronica.pro

Организаторы



При поддержке



Оператор форума



ПрофКонференции