

## Дополнительная характеристика для нормирования инфракрасной заметности летательных аппаратов

Нестеров М.С.\*, Попело В.Д.\*\*

*Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,  
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

\*e-mail: [maximnestor@mail.ru](mailto:maximnestor@mail.ru)

\*\*e-mail: [popelovd@gmail.com](mailto:popelovd@gmail.com)

### Аннотация

Введена характеристика для количественного описания инфракрасной (ИК) заметности с учетом равновесного собственного излучения летательного аппарата (ЛА). Рассмотрены производные от неё физические величины для случая наблюдения ЛА, как линейного и распределенного объекта. Установлена связь эффективной излучающей поверхности (ЭИП) с применяемыми в настоящее время характеристиками ИК заметности ЛА.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, инфракрасная заметность, характеристики заметности.

### Состояние вопроса

Важнейшим состоянием теплового поля образца ЛА, при котором осуществляется оценка ИК заметности, является состояние равновесного собственного излучения [1]. Формирование равновесного теплового поля происходит вследствие теплообмена с окружающей средой и баланса тепловых

потоков на поверхности объекта, которое зависит от влияния внешних условий наблюдения.

Для нормирования ИК заметности в настоящее время применяются следующие характеристики [2]:

- энергетическая яркость (лучистость) в рабочем диапазоне длин волн ИК средства;
- радиационная температура объекта исследования;
- контраст радиационных температур объекта и фона;
- контраст энергетических яркостей (лучистости) объекта и фона в рабочем диапазоне длин волн ИК средства.

Использование данных характеристик в условиях равновесного излучения вызывают затруднения, вследствие влияния на их значения условий наблюдения [3,4].

### **Дополнительная характеристика равновесного собственного излучения, отражающая ИК заметность ЛА**

Цель работы – введение характеристики, отражающей свойства ИК заметности в условиях теплового равновесия с окружающей средой, и удовлетворяющего следующим основным принципам [1]:

измеряемая величина должна быть постоянной при изменении условий наблюдения объекта в достаточно широких пределах, если свойства объекта, как цели, не изменяются во времени;

измеряемая величина должна быть связана линейной зависимостью с параметром принимаемого отраженного или излученного сигнала;

измеряемая в оптическом диапазоне величина должна быть сопоставима с аналогичными величинами, используемыми в качестве характеристик объекта в других диапазонах спектра электромагнитных волн.

В зависимости от соотношений между размерами объекта и элементом разрешения средства наблюдения все объекты могут быть отнесены к точечным, линейным и площадным объектам [5].

**Точечный объект.** Внешние источники излучения (Солнце, атмосфера, земная поверхность) создают облученность  $E_o$  вблизи объекта. Поток излучения  $F_p$ , приходящий на «наблюдаемую» ИК средством поверхность объекта будет определяться соотношением:

$$F_p = E_o \cdot A_1 \cdot Q_1, \quad (1)$$

где  $A_1$  – площадь «наблюдаемой» поверхности объекта;  $Q_1$  – фактор формы, учитывающий геометрические особенности приходящего излучения на поверхность (наклон элементарных площадок относительно направления излучения, затенение одних поверхностей другими). Энергия, приходящая от внешних излучателей поглощаясь, преобразуется в тепловую энергию, часть которой излучается поверхностью объекта по закону Стефана-Больцмана [6]. Если допустить, что распределением тепловой энергии по глубине объекта можно пренебречь, то поглощаемая энергия будет излучаться поверхностью объекта в направлении наблюдения. Это допущение позволяет получить завышенную (гарантированную)

оценку ИК заметности, так как в реальности часть поглощенной энергии будет уходить на перераспределение тепла внутри объекта. Таким образом, сделанное допущение позволяет поток излучения объекта в направлении наблюдения представить с учетом поглощенной части в виде:

$$F_u = \varepsilon \cdot \alpha \cdot E_o \cdot A_1 \cdot Q_1 \cdot Q_2, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – интегральный коэффициент излучения поверхности объекта;  $\alpha$  – интегральный коэффициент поглощения поверхности;  $Q_2$  – фактор формы, учитывающий геометрические особенности исходящего потока за счет собственного излучения (наклон элементарной поверхностей относительно линии наблюдения). Для плоской поверхности, излучающей по закону Ламберта,  $Q_2 = \cos \psi$ , где  $\psi$  – угол между нормалью к поверхности и направлением наблюдения. Энергетическая освещенность (облученность), создаваемая объектом на входной апертуре приемника излучения определяется соотношением:

$$E = \frac{\tau \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot E_o \cdot A_1 \cdot Q_1 \cdot Q_2}{L^2 \cdot \omega_o}, \quad (3)$$

где  $\tau$  – коэффициент пропускания атмосферы на трассе «объект – средство наблюдения»;  $A_2$  – площадь входной апертуры приемника излучения;  $L$  – расстояние от объекта до средства наблюдения;  $\omega_o$  – телесный угол, заполняемый исходящими лучами.

Комплекс величин  $\varepsilon \cdot \alpha \cdot A_1 \cdot Q_1 \cdot Q_2 / \omega_o$  характеризует объект как источник собственного теплового излучения и демонстрирует сложный характер связи излучательных свойств с геометрическими, оптическими и теплофизическими

параметрами объекта. Восстановление по результатам эксперимента значений указанных параметров и характера их взаимосвязи представляет достаточно сложную задачу, необходимость решения которой можно обойти путем введения характеристики эффективной излучающей поверхности (ЭИП) для собственного теплового излучения. ЭИП имеет размерность  $m^2$ . Смысл введения заключается в том, чтобы сделать неразличимыми величины откликов (решений прямой задачи) от реального объекта и модельных объектов с очень простым характером собственного излучения.

В качестве модельного объекта при исследовании закономерностей собственного теплового излучения можно использовать плоский «абсолютно черный» излучатель площадью  $S_t$ , перпендикулярный направлению наблюдения, создающий в условиях равновесия со средой такую же энергетическую освещенность (облученность) на апертуре радиометра, что и реальный объект. В этом случае справедливо равенство

$$S_t / \pi = \varepsilon \cdot \alpha \cdot A_1 \cdot Q_1 \cdot Q_2 / \omega_o. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получим выражение для потока излучения  $F_{np}$ , приходящего на приемник, которое заметно проще, чем исходное выражение (3):

$$F_{np} = \frac{\tau \cdot S_t \cdot E_o \cdot A_2}{L^2 \cdot \pi}, \quad (5)$$

Введение величины ЭИП, представляющая собой площадь ламбертовского излучателя, создающих на расстоянии  $L$  такой же по облученности сигнал, что и реальный объект, позволяет резко упростить решение прямой задачи, но, самое

главное, сделать однозначным решение обратной задачи восстановления значения характеристики объекта по измеренной величине принятого сигнала [7].

ЭИП является количественной мерой свойства объекта равномерно излучать электромагнитную волну в ИК диапазоне длин волн. Особенностью вводимой характеристики ЭИП является наличие линейной зависимости с параметром сигнала на приемнике излучения ИК средства. Исходя из данного выше определения, ЭИП сопоставима с энергетической характеристикой эффективной площадью рассеяния (ЭПР), которая широко используется в радиолокации для отображения свойств радиолокационной заметности.

**Линейный объект.** Для характеристики линейных объектов вводится линейная плотность ЭИП (размерность, метр).

$$F_{np} = \frac{2\tau \cdot \gamma_l \cdot E_o \cdot A_2 \cdot \theta_x}{L \cdot \pi}, \quad (6)$$

где  $\gamma_l = \frac{S_l}{2\theta_x \cdot L}$  – линейная плотность ЭИП;  $\theta_x$  – угол поля зрения элемента

разрешения средства наблюдения.

**Площадной объект.** Вводится понятие поверхностная плотность ЭИП распределенного объекта, как отношение ЭИП реального объекта к площади его проекции в направлении наблюдения. Данная характеристика является безразмерной величиной.

$$F_{np} = \frac{2\tau \cdot \beta_l \cdot E_o \cdot A_2 \cdot \omega}{\pi}, \quad (7)$$

где  $\beta_t = \frac{S_t}{\omega \cdot L^2}$  – поверхностная плотность ЭИП;  $\omega$  – телесный угол, из которого

наблюдается объект на приемнике излучения.

Характеристики собственного излучения объектов различных типов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики собственного излучения объектов различных типов

Тип объекта	Характеристика	Размерность единицы
Точечный объект	ЭИП	м <sup>2</sup>
Линейный объект	Линейная плотность ЭИП	м
Площадной объект	Поверхностная плотность ЭИП	1

### **Связь вводимого параметра с уже применяющимися при оценке ИК заметности ЛА характеристиками**

Значение энергетической яркости легко рассчитать, опираясь на значение поверхностной плотности ЭИП  $\beta_t$  для площадного объекта:

$$L_p = \beta_t \frac{E_o}{\pi}, \quad (8)$$

где  $L_p$  – энергетическая яркость реального тела, Вт/м<sup>2</sup>·ср.

Связь поверхностной плотности ЭИП с радиационной температурой устанавливается законом Стефана-Больцмана:

$$T_p = \sqrt[4]{\sigma \cdot \beta_t \cdot E_o}, \quad (9)$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана.

### **Выводы**

Таким образом, ЭИП является характеристикой ИК заметности объекта, находящегося в состоянии равновесного излучения. ЭИП, и производные от неё характеристики являются постоянными при изменении условий наблюдения объекта. Характеристики обладают линейной зависимостью с параметром сигнала на приемнике излучения. ЭИП сравнима с эффективной площадью рассеяния (ЭПР), используемой в радиолокации. Поверхностная плотность ЭИП сопоставима с коэффициентом яркости.

### **Библиографический список**

1. Гулидов, А.А. Балыбин В.А., Ляхов П.Р., Соломин Э.А. Системы испытаний вооружения, военной специальной техники на заметность. Возможности, результаты, перспективы // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации -2016: тематический сборник. – М.: Информационный мост, 2016. С. 46-49.
2. Понькин В.А., Петещенков Э.А., Афанасьева Е.М., Бостынец И.П., Ельцов О.Н., Лаптев И.В., Семенякин А.Ю. Оптическая заметность летательных аппаратов: Монография. – Воронеж: Научная книга, 2015. – 553 с.

3. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио, 1978. – 400 с.
4. Мурлага А.Р. Способ ослабления энергии электромагнитного излучения модифицированным водяным паром // Труды МАИ. 2013. №68. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41988>
5. Тымкул В.М., Тымкул Л.В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета: Учебное пособие. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 215 с.
6. Блох А.Г. Теплообмен излучением. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 430 с.
7. Иванов В.С., Золотаревский Ю.М., Котюк А.Ф., Либерман А.А. Основы оптической радиометрии. – М.: Физматлит, 2003. – 544 с.