

УДК 621.315.592

Оценка эффективности решения информационных задач оптико-электронной системой «смотрящего» типа с инфракрасным матричным фотоприёмным устройством в поле лазерного излучения

М.В. Сахаров, Й.И. Астраускас

В работе рассмотрен подход к оценке вероятностей обнаружения, классификации, распознавания и идентификации объектов оптико-электронными системами «смотрящего» типа, построенными на базе инфракрасных матричных фотоприёмных устройств, в условиях изменения температурного разрешения отдельных областей чувствительных элементов матричного фотоприёмника вследствие попадания в поле лазерного излучения.

PACS: 42.70.Gi, 44.10+i, 66.70.Dr, 73.61.Ga, 78.30.Fs, 79.60.Jv

Ключевые слова: оптико-электронная система, матричное фотоприёмное устройство, лазерное излучение, эффективность.

Введение

Инфракрасные оптико-электронные системы (ОЭС) современных информационных систем строятся, как правило, на базе матричных фотоприёмных устройств (МФПУ), позволяющих реализовать методы электронного сканирования и пространственной выборки изображений [1]. Режим формирования теплового изображения, предусматривающий опрос отдельных чувствительных элементов (ЧЭ) матричного фотоприёмника (МФП) с последующей обработкой получаемых электрических сигналов, называют «смотрящим» режимом, а сами ОЭС – «смотрящего» типа. К настоящему времени ОЭС такого типа и МФПУ получили существенное развитие и успешно применяются для решения ряда прикладных задач, в том числе – в системах технического зрения. К основным показателям эффективности ОЭС, отражающим стохастический характер процессов решения ими информационных задач, относят вероятности обнаружения, классификации, распознавания и идентификации объектов, находящихся в угловом поле ОЭС, а также средние времена решения этих задач. Перечисленные показатели эффективности, в свою очередь, зависят от технических параметров ОЭС (отношение сигнал-шум, пороговая чувствительность, обнаружительная способность, температурное разрешение и др.), определяющих возможности решения их задач в различных условиях применения, и показателей качества изображения, сформированного ОЭС (геометрооптическая разрешающая способность, контраст изображения и др.).

Отдельный интерес представляет задача оценки эффективности решения ОЭС информационных задач в условиях действия помех естественного и техногенного характера, случайных и преднамеренных. Примерами источниками техногенных помех могут являться широкополосные и лазерные излучатели, в поле действия которых могут оказаться инфракрасные ОЭС. Результатом такого действия могут явиться: а) интенсивная засветка всего поля МФП или некоторой его части – на время действия помехи; б) безынерционное и инерционное ухудшение чувствительности – при тепловом характере воздействия помехи; в) деградация – при высокой интенсивности помехи [2–5]. Особенно существенно проявляется действие на МФП лазерного излучения, поскольку оно узко направленно и вся энергия излучения, падающего на входную апертуру ОЭС, концентрируется на МФП. Вследствие этого отдельные ЧЭ, некоторые их области или, в предельном случае, все поле МФП, вышедшие из номинального режима работы, не участвуют в построении теплового изображения детектируемого объекта.

Целью данной работы является разработка математического аппарата оценки эффективности решения информационных задач ОЭС «смотрящего» типа с инфракрасным матричным фотоприёмным устройством в поле лазерного излучения.

Общие положения

Одним из основных параметров ЧЭ инфракрасных (ИК) МФП, определяющим их температурное разрешение, является эквивалентная шуму разность температур [1]:

$$\Delta T_n = \Delta T / \mu,$$

где $\mu = \Delta U / \sigma_u$ – отношение сигнал-шум; ΔU – изменение сигнала на выходе ЧЭ, соответствующее разности температур цели и фона $\Delta T = T_c - T_f$; σ_u – среднеквадратическое значение шума.

Нагрев ЧЭ МФП вследствие воздействия ЛИ с номинального значения рабочей температуры T_0 до T при

Сахаров Михаил Викторович, нач. кафедры.

Астраускас Йонас Иона, адъюнкт.

Военная академия РВСН им. Петра Великого.

Россия, 109074, Москва, Китайгородский проезд, 9.

Тел.: (495) 696-34-12. E-mail: m_sakharov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2013 г.

© Сахаров М.В., Астраускас Й.И., 2014

одних и тех же температурах детектируемого объекта и шума приведет к уменьшению отношения сигнал-шум в K_μ раз:

$$K_\mu = \frac{\mu(T)}{\mu(T_0)} = \frac{\Delta U(T)}{\Delta U(T_0)}$$

и, следовательно, к увеличению эквивалентной шуму разности температур в $1/K_\mu$ раз:

$$\frac{\Delta T_n(T)}{\Delta T_n(T_0)} = \frac{\mu(T_0)}{\mu(T)} = \frac{\Delta U(T_0)}{\Delta U(T)} = \frac{1}{K_\mu}$$

Пороговое отношение сигнал-шум, необходимое для разрешения наблюдателем тепловой миры с доверительной вероятностью $P_\delta = 0,5$, принимают $\mu_n = 2,0-2,5$; при больших значениях доверительной вероятности $\mu_n = 3,4-6,4$ [1]. Далее будем полагать, что ЧЭ, у которых вследствие облучения ЛИ $\mu < \mu_n$ при заданном значении P_δ , не участвуют в построении теплового изображения детектируемого объекта.

Показатели эффективности ОЭС – вероятности обнаружения $P_{обн}$, классификации $P_{кл}$, распознавания $P_{расп}$ и идентификации $P_{ид}$ объектов, находящихся в угловом поле ОЭС, связаны с пространственным разрешением f_{xy} , рассчитываемым по формуле:

$$f_{xy} = \frac{N_p L}{\sqrt{h_{крx} h_{кpy}}} \quad (1)$$

Показатель пространственного разрешения f_{xy} определяет число элементов разрешения N_p , в которое должен укладываться находящийся на расстоянии L объект с критическими размерами $h_{крx}$ и $h_{кpy}$. В свою очередь, число разрешаемых элементов изображения объекта связано с минимальной угловой разрешающей способностью

$$\varphi \approx \frac{\Delta}{f'}, \quad (2)$$

где Δ – линейный размер фоточувствительной площадки ЧЭ МФП (для современных ИК МФП $\Delta = 20...30$ мкм); f' – фокусное расстояние входной оптики.

Таким образом, вероятности решения ОЭС информационных задач могут быть оценены с учетом размера и формы области (областей) ЧЭ МФП, не участвующих в построении теплового изображения детектируемого объекта, и вероятности нахождения $P_{нз}$ геометрического центра $O_{и}(x_{и}, y_{и})$ изображения объекта в пределах поля зрения МФП.

В зависимости от назначения ОЭС с МФП размерностью $N_{x \max} \times N_{y \max}$, вероятность $P_{нз}$ появления детектируемого объекта в пределах углового поля зрения ОЭС может быть принята распределённой по равномерному закону с плотностью

$$f_{нз}(x_{и}, y_{и}) = \frac{1}{l_x \cdot l_y} = \frac{1}{n_{x \max} \cdot n_{y \max} \cdot \Delta^2} = const, \quad (3)$$

где $l_x = n_{x \max} \cdot \Delta$; $l_y = n_{y \max} \cdot \Delta$ – линейные размеры МФП, или по нормальному закону с плотностью

$$f_{нз}(x_{и}, y_{и}) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\left(x_{и} - \frac{l_x}{2}\right)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{\left(y_{и} - \frac{l_y}{2}\right)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right), \quad (4)$$

где σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения геометрического центра теплового изображения объекта от центра МФП.

Вероятность удержания объекта в пределах поля МФП связана с функцией распределения $f_{нз}(x_{и}, y_{и})$ формулой

$$P_{нз} = \int_{x_{и}=0}^{l_x} \int_{y_{и}=0}^{l_y} f_{нз}(x_{и}, y_{и}) dx_{и} dy_{и} \quad (5)$$

Оценку эффективности ОЭС проведём по усреднённым с учётом функции распределения $f_{нз}(x_{и}, y_{и})$ по всему полю МФП значениям вероятностей решения соответствующих задач:

$$\bar{P}_{зад} = \int_{x_{и}=0}^{l_x} \int_{y_{и}=0}^{l_y} P_{зад}(N'_p(x_{и}, y_{и})) \cdot f_{нз}(x_{и}, y_{и}) dx_{и} dy_{и}, \quad (6)$$

где $P_{зад}(N'_p(x_{и}, y_{и}))$ – вероятность решения задачи ОЭС, зависящая от числа $N'_p(x_{и}, y_{и})$ нормально функционирующих ЧЭ МФП в области формируемого на МФП теплового изображения объекта с геометрическим центром $O_{и}(x_{и}, y_{и})$ и критическими размерами $h_{крx}$ и $h_{кpy}$. Для расчётов по формуле (6) могут быть использованы зависимости $P_{зад}(N'_p)$, приведенные в [6–8].

Таким образом, вероятности решения ОЭС информационных задач в поле лазерного излучения связаны с параметрами детектируемого объекта (его критическими размерами, приведенными к плоскости МФП), с параметрами МФП (форматом, линейными размерами), а также с местом, формой и размерами области (областей) ЧЭ МФП, не участвующих в построении теплового изображения объекта вследствие ухудшения их температурного разрешения.

Критические размеры объекта, приведённые к плоскости МФП, в функции дальности L определим по формулам:

$$h'_{крx}(L) = h_{крx} \frac{f'}{L} \quad h'_{кpy}(L) = h_{кpy} \frac{f'}{L}, \quad (7)$$

где f' – фокусное расстояние объектива ОЭС. Тогда число элементов разрешения МФП N_p , на которое проецируется изображение объекта, может быть определено с учётом формы изображения объекта через число элементов разрешения вдоль критических размеров:

$$N_{p \ x} = \frac{h'_{крx}}{\Delta} \quad N_{p \ y} = \frac{h'_{кpy}}{\Delta} \quad (8)$$

В общем случае, число N_p может иметь дробную часть, что позволяет учитывать вклад в формирование теплового изображения объекта элементов разрешения, не полностью накрываемых проекцией объекта.

При условии проецирования объекта (или некоторой его части) в область (области) ЧЭ МФП, не участвующих в построении теплового изображения, число нормально

функционирующих элементов разрешения в области проекции объекта:

$$N'_p(x_u, y_u) = N_p(x_u, y_u) - N_{\text{фн}}(x_u, y_u), \quad (9)$$

где $N_{\text{фн}}(x_u, y_u)$ – число не участвующих в построении изображения объекта вследствие попадания МФП в поле ЛИ и принадлежащих области проекции объекта.

Пример графика зависимости $N'_p(x_u, y_u)$ показан на рис. 1.

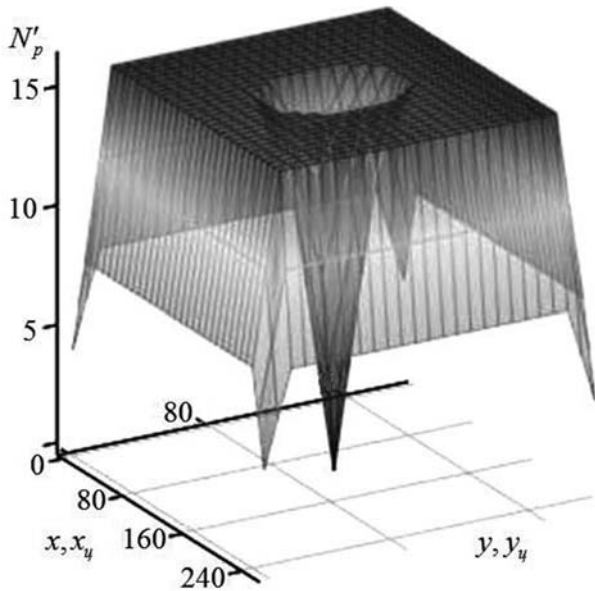


Рис. 1. Пример графика зависимости числа нормально функционирующих ЧЭ МФП N'_p от положения геометрического центра $O_u(x_u, y_u)$ теплового изображения объекта при попадании ОЭС в поле лазерного излучения.

Методика оценки эффективности решения информационных задач ОЭС с ИК МФПУ «смотрящего» типа в поле лазерного излучения

Ограничения и допущения: а) вероятность удержания объекта в пределах углового поля зрения ОЭС в течение рассматриваемого времени $P_{\text{уз}} \rightarrow 1$; б) объект при решении задач ОЭС имеет ракурс такой, что его оси параллельны осям МФП; в) место и размер области (областей) ЧЭ МФП, не участвующих в построении изображения объекта вследствие попадания МФП в поле ЛИ, в течение рассматриваемого времени не изменяются; г) вероятность появления (удержания) объекта в пределах углового поля зрения ОЭС распределена по равномерному или нормальному законам; д) программная коррекция изображения в нерабочих областях МФП не учитывается.

Исходные данные. Параметры и характеристики объекта: $h_{\text{кр}x}, h_{\text{кр}y}$ – критические размеры; L – дальность до объекта. Параметры и характеристики ОЭС: $n_{x\text{max}}, n_{y\text{max}}$ – размерность МФП; Δ – линейный размер фоточувствительной площадки ЧЭ МФП; σ_x, σ_y – СКО геометрического центра теплового изображения объекта от центра МФП; закон распределения вероятности появления (удержания) изображения объекта в пределах углового поля зрения ОЭС; δ – доля ЧЭ МФП, а также количество, форма, размер и положение области (областей) ЧЭ МФП, не участвующих в построении изображения объекта.

Порядок расчетов.

1. Определение критических размеров объекта, приведённых к плоскости МФП $N_{p,x}, N_{p,y}$ по (8).

2. Определение числа элементов разрешения МФП N_p в области проекции объекта с учётом его расположения и формы.

3. Определение числа нормально функционирующих элементов разрешения N'_p в области проекции объекта с учётом его расположения и формы, а также формы, размера и положения области (областей) ЧЭ МФП, не участвующих в построении изображения объекта по (9).

4. Определение вероятностей решения задач МФП $P_{\text{зад}}(N'_p(x_u, y_u))$ по зависимостям, приведенным в [6–8].

5. Определение значения вероятности появления (удержания) объекта в пределах углового поля зрения ОЭС с учётом закона распределения $f_{\text{уз}}(x_u, y_u)$.

6. Расчёт усреднённых по всему полю МФП значений вероятностей решения информационных задач $\bar{P}_{\text{зад}}$ по (6) с учётом пп. 1–5.

Для автоматизации процесса расчёта показателей эффективности решения ОЭС информационных задач в поле лазерного излучения по разработанной методике в среде Mathcad создана программная модель.

Анализ результатов использования методики

На рис. 2 показан один из результатов использования данной программной модели, представляемых в виде нормированных графиков распределения вероятностей решения ОЭС информационных задач. В качестве примера приведен график зависимости вероятности распознавания объекта, находящегося в угловом поле ОЭС, от положения геометрического центра его изображения при нормальном законе распределения вероятности расположения объекта в поле МФП с одной областью ЧЭ МФП, не участвующих в построении теплового изображения объектов, круглой формы с центром, совпадающим с центром МФП (см. рис. 1).

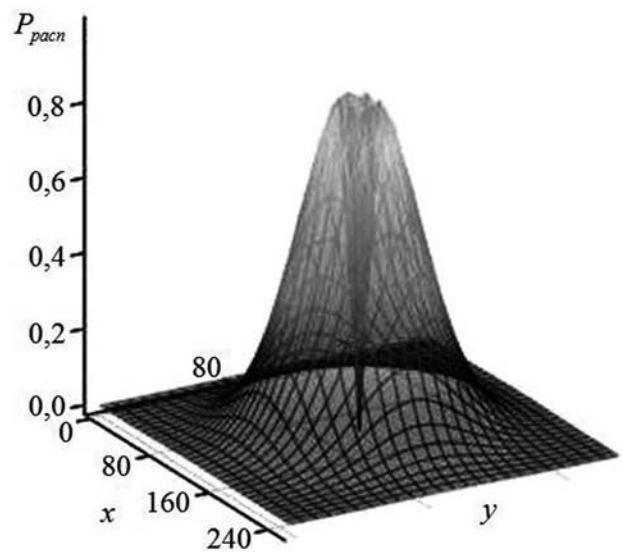


Рис. 2. Пример графика зависимости вероятности распознавания объекта, находящегося в угловом поле ОЭС, от положения геометрического центра его теплового изображения в плоскости МФП при нормальном законе распределения вероятности расположения объекта в поле МФП.

Для расчётов в качестве изображения объекта в плоскости МФП взят квадрат, по площади сопоставимый с областью ЧЭ МФП, не участвующих в построении теплового изображения. Программная модель позволяет получить аналогичные графики и для оценки вероятностей решения других информационных задач и при других видах закона распределения вероятности расположения объекта в поле МФП.

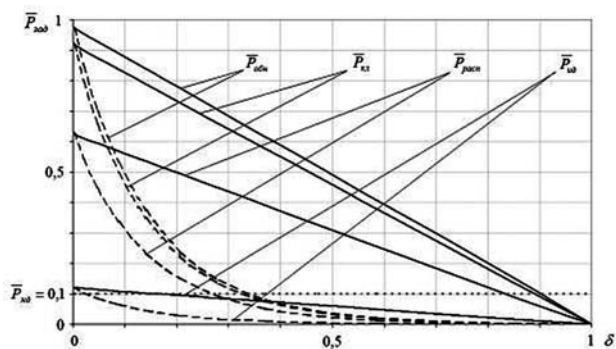


Рис. 3. Пример графика зависимости показателей эффективности ОЭС $P_{эф}$ с МФП размерностью 256×256 от доли δ ЧЭ МФП, не участвующих в построении теплового изображения объекта, при равномерном (сплошные линии) и нормальном (пунктирные кривые) распределениях вероятности появления (удержания) объекта в поле МФП для критических размеров объекта в плоскости МФП 2×2 элемента разрешения.

На рис. 3 показаны пример одного из результатов использования методики оценки эффективности решения ОЭС информационных задач в поле лазерного излучения. На графиках показан принятый недопустимый уровень снижения вероятностей решения ОЭС информационных задач $P_{уд} = 0,1$. Из анализа результатов расчетов по разработанной методике следует, что чем меньше размер изображения объекта в плоскости МФП и больше доля ЧЭ МФП, не участвующих в построении теплового изображения объекта, тем ниже эффективность ОЭС и наоборот. При этом наиболее критично попадание ОЭС в

поле лазерного излучения при нормальном распределении вероятности удержания объекта в поле МФП и ухудшении температурного разрешения ЧЭ до неприемлемой величины вблизи центра МФП.

Заключение

Разработанная методика и созданная на её основе программная модель позволяют проводить оценку вероятностей обнаружения, классификации, распознавания и идентификации объектов ОЭС «смотрящего» типа, построенными на базе ИК МФПУ, в условиях изменения температурного разрешения отдельных областей ЧЭ МФП вследствие попадания в поле лазерного излучения с различными энергетическими, временными, спектральными и пространственными параметрами. Результаты работы могут быть использованы при обосновании способов и средств защиты ОЭС от попадания в их угловое поле зрения лазерного излучения.

Литература

1. Тарасов В.В., Якушников Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004 г.
2. Сахаров М.В., Суханов Я.А., Дяченко И.В. и др. Взаимодействие лазерного излучения с материалами оптико-электронной техники. Монография. / Под ред. Захарова Н.С. – Сергиев-Посад: ЦФТИ, 2004.
3. Сахаров М.В., Средин В.Г., Астраускас Й.И., Васильева Ю.В. // Известия ВУзов. Физика. 2013. Т. 56, № 9/2. С. 98.
4. Средин В.Г., Сахаров М.В. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 5.
5. Стафеев В.И., Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Средин В.Г., Сахаров М.В., Суховой С.Б. // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2007. № 2. С. 31.
6. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: МИР, 1978 .
7. Horman S.R., Headley P.M., Zurasky M.W. et al. // Proc. SPIE. 1999. V. 4029. P. 121.
8. Infrared and Electro-optical System Handbook / Ed. By J.S. Accetta and D.L. Shumaker. – Bellingham: SPIE Proc. 1993.

Performance evaluation of the information problems solving by staring type optical-electronic system with infrared focal plane array in laser irradiation field

M. V. Sakharov and J. J. Astrauskas

Peter The Great Military Academy of Strategic Rocket Force
9 Kitaigorodskii passage, Moscow, 109074, Russia.
E-mail: m_sakharov@mail.ru

Received January 20, 2014

In this work we discussed the approach to assessments of chances of objects finding, classification, recognition and identification by infrared FPA-based staring type optical-electronic systems in temperature resolution changing of the some sensing element's areas of the FPA as a result of appearance in laser irradiation field.

PACS: 42.70.Gi, 44.10+i, 66.70.Dr, 73.61.Ga, 78.30.Fs, 79.60.Jv

Keywords: optical-electronic system, focal plane array, laser irradiation, efficiency.

References

1. V. V. Tarasov and Yu. G. Yakushenkov, *Infrared System of the Staring Type* (Logos, Moscow, 2004) [in Russian].
2. M. V. Sakharov, Ya. A. Sukhanov, et al., *Interaction of a Laser Radiation with Materials of the Optical-Electronic Technique*. Ed. by N.S. Zakharov (CPhTI, Sergiev Posad, 2004) [in Russian].
3. M. V. Sakharov, V. G. Sredin, J. J. Astrauskas, et al., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Physics* **56** (9/2), 98 (2013).
4. V. G. Sredin and M. V. Sakharov, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 5 (2011).
5. V. N. Stafeev, I. D. Burlakov, et al., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Mater. Elektron. Tekhn.*, No. 2, 31 (2007).
6. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).
7. S. R. Horman, P. M. Headley, M. W. Zurasky, et al., *Proc. SPIE* **4029**, 121 (1999).
8. *Infrared and Electro-optical System Handbook*. Ed. by J. S. Accetta and D. L. Shumaker (Bellingham: SPIE Proc., 1993).