

**Микитенко Владимир Иванович**

*кандидат технических наук, доцент кафедры оптических и оптико-электронных приборов  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

**Плави Ванзос Эмилия Сильвиянь**

*студент*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

**Mikitenko V. I.**

*Dr. Sc. (Eng.), assistant Professor of the Chair of Optical and Optoelectronic Devices.*

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*

**Plavi Vanzos E. S.**

*student*

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*

## ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ С ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ КАНАЛОМ

**Аннотация:** Данная статья посвящена проблемам обнаружения целей при помощи оптико – электронных систем наблюдения в условиях плохой видимости. Рассмотрены особенности оценки эффективности функционирования многоканальных оптико-электронных систем что включают поляризационный канал. Решается проблема улучшения качества изображений полученных из разных каналов с помощью комплексирования. Предложен новый показатель качества изображений с дополнительным каналом поляризованных изображений на основе модифицированного показателя успешности выполнения задания ТТР(targeting task performance).

**Ключевые слова:** многоканальные оптико-электронные системы наблюдения, поляризационные характеристики, спектральный канал, обнаружение, изображение.

**Summary:** This article deals with the problems of target detection using optical – electronic surveillance systems in poor visibility. The features assess the efficiency of multichannel optoelectronic systems containing polarizing channel. Solves the problem of improving the quality of images received from different channels by means of integration. The new Quality images with additional channel polarized images based on modified assignment success rate ТТР (targeting task performance)

**Key words:** multi-channel electro-optical observation systems, polarization characteristics, spectral channel, detection, image.

### Введение

Многоканальные оптико-электронные системы наблюдения (МОЭСН) содержат несколько различных информационных каналов (как минимум телевизионный (ТВ) и тепловизионный (ТПВ)), функционально связанных между собой, а также с бортовым компьютером, системами связи, навигации и с другими датчиками [1]. МОЭСН дают возможность проводить круглосуточные, всепогодные наблюдения, обнаружение, сопровождение объектов различного базирования, разведку, оценку экологического состояния, выявление и мониторинг чрезвычайных ситуаций.

Дальнейшее повышение эффективности функционирования МОЭСН возможно за счет внедрения в многоканальные системы поляризационного канала. Этот вопрос до сих пор недостаточно исследован. Поэтому является целесообразной разработка методик

оценки эффективности объединения данного канала с другими.

МОЭСН относятся к иконическим системам, то есть потребителем конечной информации является оператор. Для объединения информации с различных датчиков в МОЭСН используют комплексирование. Это повышает информативность результирующего изображения по сравнению с изображениями, полученными в отдельных каналах МОЭСН, улучшает осознание ситуации оператором и увеличивает эффективность системы в целом. Для оценки качества комплексированного изображения существует ряд показателей [2–4]. Эти показатели хорошо коррелируют с субъективным восприятием изображения оператором, но не дают возможности оценить процессы преобразования информации в различных каналах и их вклад в общую эффективность системы. С другой стороны, есть много наработок относительно оценивания эффективности

функционирования отдельных каналов МОЭСН [5, 6], которые дают возможность детально исследовать влияние параметров блоков системы на характеристики изображения, сформированного в одном канале. То есть на сегодня возможны как оценка качества комплексирования, так и оценка эффективности отдельных каналов МОЭСН, но независимо и без привязки друг к другу.

Следовательно, целесообразно разработать методику, которая давала бы возможность объединить показатели качества комплексированного изображения с показателями эффективности отдельных каналов МОЭСН для того, чтобы оценить эффективность всей системы при комплексировании информации разных каналов.

**Постановка задачи**

Целью исследований является оценка эффективности метода комплексирования изображений в МО-

ЭСН при использовании дополнительного поляризационного информационного канала. Выполнить данную задачу возможно с помощью определения вероятностных характеристик обнаружения и распознавания.

**Расчет поляризации собственного излучения объектов**

Для получения информации о трехмерных геометрических характеристиках наблюдаемого объекта внутри теплового контура можно использовать поляризационные тепловизионные изображения, получаемые путем введения в оптическую схему прибора поляризационных фильтров. В общем случае поляризация собственного излучения материалов возникает из-за явлений отражения и преломления на границе «вещество–воздух», которые обстоятельно описыва-

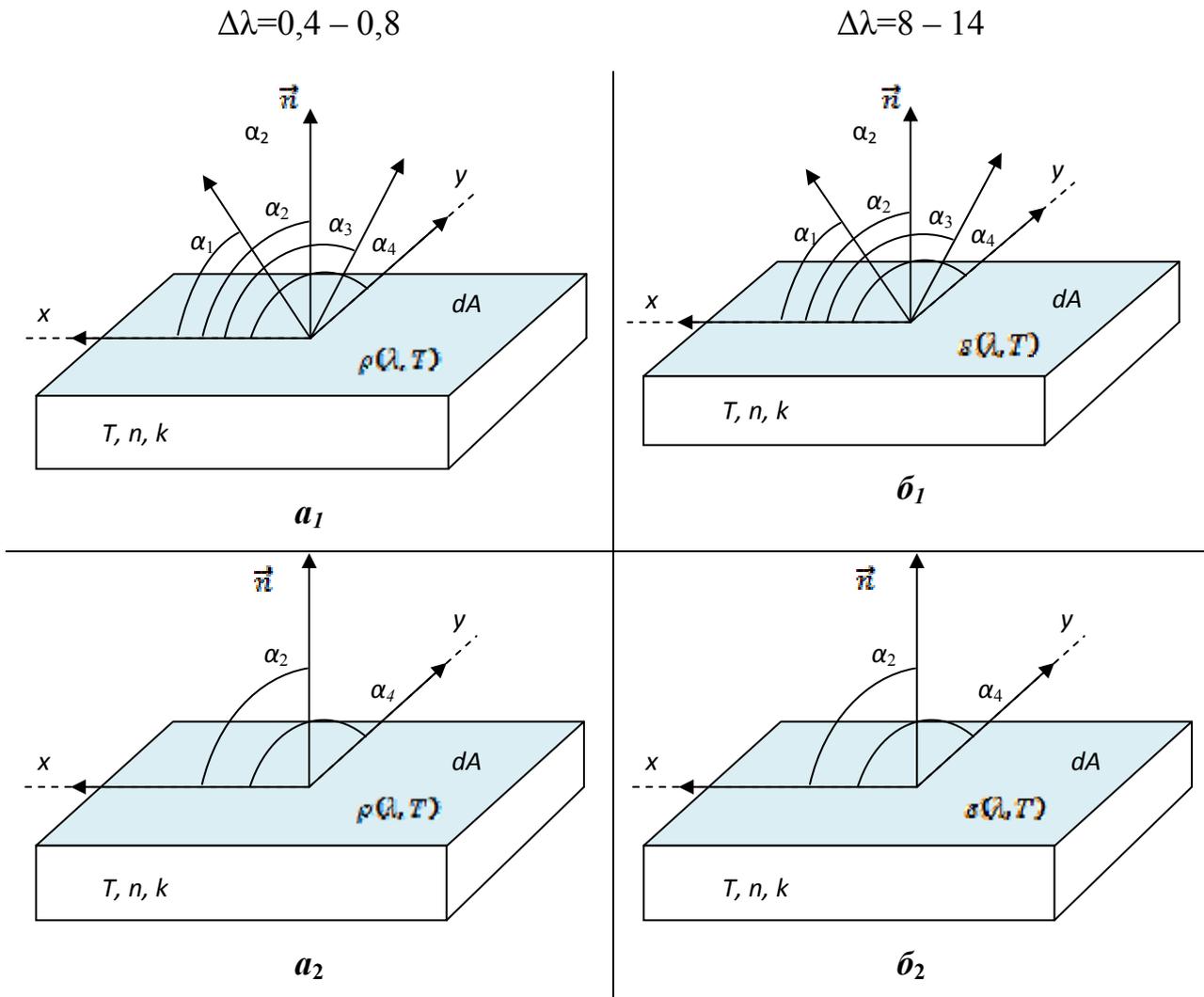


Рис. 1. Схема физического обоснования поляризации собственного теплового излучения объекта  
 $a_1$  — поляризация изображения с азимутами  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  в видимом диапазоне,  $a_2$  — поляризация изображения с азимутами  $0^\circ, 90^\circ$  в видимом диапазоне,  $b_1$  — поляризация изображения с азимутами  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  в ИК диапазоне,  $b_2$  — поляризация изображения с азимутами  $0^\circ, 90^\circ$  в ИК диапазоне

ются теорией отражения Френеля для металлов и диэлектриков [9, 10]. При этом степень поляризации собственного излучения поверхности повышается по мере увеличения угла между направлением излучения и нормалью к излучающей поверхности [11].

Для наглядности, с использованием рисунка 1, рассмотрим формирование собственного излучения элемента  $dA$  поверхности объекта, его энергетические и поляризационные характеристики.

На данном рисунке приняты обозначения:  $n$  и  $k$  — действительная и мнимая части комплексного показателя преломления материала элемента  $dA$  поверхности объекта;  $n$  — нормаль элемента  $dA$  поверхности;  $\psi$  — угол излучения элемента поверхности;  $T$  — абсолютная температура поверхности объекта;  $\rho(\lambda, T)$ ,  $\alpha(\lambda, T)$  и  $\varepsilon(\lambda, T)$  — коэффициенты отражения, поглощения и излучения поверхности объекта.

Известен способ определения трехмерной формы объектов, суть которого заключается в сканировании поверхности объекта по строке и кадру (Рис.1,  $a_1$ ,  $b_1$ ), причем поляризуют оптический сигнал, преобразуют полученный поляризационный сигнал в электрический с последующим запоминанием и формируют 4 поляризационных тепловизионных изображения с азимутами поляризации  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  соответственно для определения формы объекта внутри контура по формулам, основанных на значениях полученных видеосигналов каждого элемента разложения кадра [17]. Таким образом, по четырем поляризационным тепловизионным изображениям можно определить угол наклона  $\psi(N, K)$  каждого элемента поверхности объекта по отношению к направлению наблюдателя.

На практике использование данного метода является нецелесообразным, в связи с емкими математическими вычислениями и сравнительной длительностью процесса. Предлагается формировать два поляризационных тепловизионных изображения с азимутами поляризации  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ .

Нормированные сигналы в изображении для каждой элементарной площадки объекта определяются по формулам:

$$U_H^1(N, K) = 1 + P(N, K) \cos 2t(N, K), \quad (1)$$

$$U_H^2(N, K) = 1 + P(N, K) \sin 2t(N, K). \quad (2)$$

При решении этих уравнений как системы, можно выразить через сигналы  $U_1$ ,  $U_2$  степень и азимут поляризации:

$$2t = \operatorname{arctg} \frac{(U_2^H - 1)}{(U_1^H - 1)}, \quad (3)$$

$$P = \frac{(U_1^H - 1)}{\cos(\operatorname{arctg} \frac{(U_2^H - 1)}{(U_1^H - 1)})}. \quad (4)$$

Анализируя связь степени поляризации  $P$  собственного теплового излучения различных материалов, в работах [13, 15, 17] теоретически и экспериментально установлено следующее соотношение:

$$P(\psi) = a(1 - \cos \psi). \quad (5)$$

Тогда, с учетом этого соотношение формул (2) и (3) угол наблюдения  $\psi$  можно записать в виде:

$$\psi(N, K) = \arccos \left\{ 1 - \frac{[U_2(N, K) - 1]}{a \times \sin \left\{ \frac{U_2(N, K) - 1}{U_1(N, K) - 1} \right\}} \right\}. \quad (6)$$

Энергетическая яркость  $L(\lambda, T; x, y)$  собственного излучения, элемента  $dA$  поверхности объекта которое регистрируется приемником оптического излучения [12, 13, 14] описывается законом Кирхгофа

$$\pi W(\lambda, T; x, y) = \pi \varepsilon(\lambda, T; x, y) \varepsilon(\psi) W^0(\lambda, T), \quad (7)$$

где  $\varepsilon(\lambda, T; x, y)$  — функция распределения спектрального коэффициента излучения элемента поверхности объекта;  $\varepsilon(\psi)$  — индикатриса коэффициента излучения элемента  $dA$  поверхности объекта.

$$L \perp (\lambda, T; x, y) = \frac{1}{\pi} \varepsilon(\lambda, T; x, y) \varepsilon(\psi) W^0(\lambda, T), \quad (8)$$

где  $W^0(\lambda, T)$  — функция Планка для светимости абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой  $T$ :

$$W^0(\lambda, T) = C_1 \left( \lambda^5 \exp \left[ \frac{C_2}{\lambda T} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad (9)$$

где  $C_1 = 3.74 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4 / \text{см}^2$ ,  $C_2 = 1,438 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$  — постоянные. Согласно этому фундаментальному закону излучения тел, собственное излучение наблюдаемого объекта формируется под влиянием двух факторов: первый фактор — это непосредственно излучение тела, которое описывается формулой Планка, и зависит от теплового состояния тела; второй фактор — это вклад состояния поверхности тела, который определяется коэффициентом излучения материала поверхности и состоянием шероховатости.

При этом, коэффициент излучения  $\varepsilon(\lambda, T)$  зависит от температуры  $T$  и постоянных материала  $n$  и  $k$  [9, 15], а состояние поверхности формирует, совместно с оптическими постоянными индикатрису излучения  $\varepsilon(\psi)$  [11]. Следует отметить, что согласно закону сохранения энергии для непрозрачных материалов и сред, находящихся в термодинамическом равновесии, коэффициенты отражения и излучения  $\rho(\lambda, T)$  и  $\varepsilon(\lambda, T)$  связаны между собой соотношением:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 1 - \rho(\lambda, T). \quad (10)$$

Что касается поляризационных свойств, то степень поляризации излучения определяет различие коэффициентов излучения объекта и для компонентов этого излучения, поляризованных в плоскости

поверхности объекта  $\varepsilon_{\parallel}$  и перпендикулярно  $\varepsilon_{\perp}$  ей соответственно. В конечном виде, значение степени поляризации собственного излучения элемента  $dA$  поверхности объекта описывается выражением:

$$P_{\psi} = \frac{L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) - L_{\perp}(\lambda, T; x, y)}{L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) + L_{\perp}(\lambda, T; x, y)} = \frac{\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}}. \quad (11)$$

Значения  $\varepsilon_{\parallel}$  и  $\varepsilon_{\perp}$  для непрозрачных материалов определяются по формулам Френеля [9, 11], которые характеризуют зависимость поляризационных составляющих излучательной способности от таких параметров материала как действительная часть  $n$  комплексного показателя преломления  $\tilde{n}$  и показателя поглощения  $k$  (мнимая часть комплексного показателя преломления  $\tilde{n}$  материала):  $\tilde{n} = n + ik$ :

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{4n \cos \psi}{(n + \cos \psi)^2 + k^2 \cos^2 \psi}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{4n \cos \psi}{(n + \cos \psi)^2 + k^2}. \quad (13)$$

В свою очередь, энергетическая яркость элемента наблюдаемой поверхности объекта, для параллельной и перпендикулярной компоненты излучения равны:

$$L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) = \frac{1}{\pi} \varepsilon_{\parallel}(\lambda, T; x, y) W^o(\lambda, T). \quad (14)$$

$$L_{\perp}(\lambda, T; x, y) = \frac{1}{\pi} \varepsilon_{\perp}(\lambda, T; x, y) W^o(\lambda, T). \quad (15)$$

Соответственно яркость в видимом диапазоне:

$$L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) = \frac{1}{\pi} (1 - \varepsilon_{\parallel}(\lambda, T; x, y)) W^o(\lambda, T). \quad (16)$$

$$L_{\perp}(\lambda, T; x, y) = \frac{1}{\pi} (1 - \varepsilon_{\perp}(\lambda, T; x, y)) W^o(\lambda, T). \quad (17)$$

Подставив (10)–(12) в (11) получим выражение для степени поляризации собственного теплового излучения элемента поверхности для угла  $\psi$ :

$$P_{\psi} = \frac{(n^2 + k^2 - 1) \sin \psi}{(n^2 + k^2 - 1)(1 + \cos^2 \psi) + 4n \cdot \cos \psi}. \quad (18)$$

Степень поляризации собственного излучения материалов во многом определяется действительной и мнимой составляющей комплексного показателя преломления, к примеру, для диэлектриков ( $k \ll 1$ , а  $1 < n < 2$ ), и излучение поляризовано слабее, чем для металлов ( $(n^2 + k^2)1/2 > 3,3$ ).

### Вероятность обнаружения в пространственно-спектральном канале, определение характеристик обнаружения и распознавания

Вероятность обнаружения, распознавания и идентификации объекта МОЭСН можно рассчитать по формуле [1]:

$$P_3(R) = \frac{\left(\frac{V_k}{V_{50}}\right)^{E(R)}}{1 + \left(\frac{V_k}{V_{50}}\right)^{E(R)}}, \quad (19)$$

где  $V_k(R) = \frac{\sqrt{A} \cdot TTP_k}{R}$  – число пар штрихов, которые размещаются на объекте;  $TTP_k$  – показатель успешности выполнения задания для системы с комплексированием;  $A$  – площадь объекта;  $K$  – расстояние от объекта до МОЭСН;  $V_{50}$  – число раздельно различимых штрихов, которые разделяются, необходимых для обеспечения 50% вероятности правильного решения в зависимости от содержания задачи;  $E_{(R)} = 1,51 + 0,24[V_k(R)/(V_{50})]$  – эмпирически определенная константа, которая зависит от спектрального диапазона и отношения  $V_k(R)/(V_{50})$ .

Определение показателя успешности выполнения задания для системы с комплексированием будет зависеть от метода комплексирования. В частности, для методов с преобразованием масштаба показатель успешности выполнения задания будет рассчитываться на каждом уровне разложения. То есть диапазон частот, общий для нескольких каналов МОЭСН, разбивается на поддиапазоны (октавы) в соответствии с количеством уровней разложения изображений, и рассчитываются значения показателя в каждом поддиапазоне. Расчет производится для пары изображений поляризованных во взаимоперпендикулярных направлениях.

$$TTP_{k\perp} = \sum_i (TTP_{1,i} \cdot R_{1,i} + TTP_{2,i} \cdot R_{2,i} + \dots + TTP_{k,i} \cdot R_{k,i}). \quad (20)$$

$$TTP_{k\parallel} = \sum_i (TTP_{1,i} \cdot R_{1,i} + TTP_{2,i} \cdot R_{2,i} + \dots + TTP_{k,i} \cdot R_{k,i}). \quad (21)$$

где  $TTP_{k\perp}$ ,  $TTP_{k\parallel}$  – показатель успешности выполнения задания  $k$ -го изображения 1-й октавы для перпендикулярной и параллельной составляющей;  $R_k = r_{k,i}^F \cdot \prod(1 - |r_{k,i}|)$  – коэффициент пропорциональности;  $r_{k,i}$  – корреляция Пирсона между входными изображениями;  $r_{k,1}^F$  – корреляция Пирсона между комплексированным и  $k$ -м входным изображением.

Корреляцию Пирсона между комплексированным изображением и входными рассчитываем по формуле [9]:

$$r_{k,i\perp}^F = \frac{\sum_{m\perp} \sum_{n\perp} (F_{k,i} - \bar{F}_{k,i})(L_{k,i} - \bar{L}_{k,i})}{\sqrt{\sum_{m\perp} \sum_{n\perp} (F_{k,i} - \bar{F}_{k,i})^2} \sqrt{\sum_{m\perp} \sum_{n\perp} (L_{k,i} - \bar{L}_{k,i})^2}}. \quad (22)$$

$$r_{k,i\parallel}^F = \frac{\sum_{m\parallel} \sum_{n\parallel} (F_{k,i} - \bar{F}_{k,i})(L_{k,i} - \bar{L}_{k,i})}{\sqrt{\sum_{m\parallel} \sum_{n\parallel} (F_{k,i} - \bar{F}_{k,i})^2} \sqrt{\sum_{m\parallel} \sum_{n\parallel} (L_{k,i} - \bar{L}_{k,i})^2}}, \quad (23)$$

где  $F_{k,i}$  – матрица значений яркости комплексированного изображения в  $i$ -й октаве пространственной частоты;  $L_{k,i}$  – матрица значений яркости  $k$ -го входного

изображения в  $i$ -й октаве пространственной частоты;  $L_{k,1}$  — усредненное значение яркости изображения в октаве.

Корреляцию Пирсона между входными изображениями находим по аналогии с  $r_{\kappa,1}$ .

Показатель успешности выполнения задания для отдельных изображений в одномерном случае можно определить как [8]

$$TTP_{k,l\perp} = \int_{f_{xH}}^{f_{xH}} \left( \frac{C_D(f_x)}{FPK_{OES\perp}(f_x)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot df_x. \quad (24)$$

$$TTP_{k,l\parallel} = \int_{f_{xH}}^{f_{xH}} \left( \frac{C_D(f_x)}{FPK_{OES\parallel}(f_x)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot df_x, \quad (25)$$

где  $f_x$  — горизонтальная пространственная частота (мрад<sup>-1</sup>);  $FPK_{OES}(f_x)$  — функция порогового контраста (ФПК) системы;  $C_D(f_x)$  — преобразование Фурье от изображения объекта на дисплее.

Общий показатель усредненности выполнения задания определяется как среднеквадратическое:

$$TTP_{k,l} = \sqrt{TTP_{k,l\perp} \cdot TTP_{k,l\parallel}}. \quad (26)$$

ФПК системы при наличии шумов дисплея можно определить следующим образом [10]:

$$FPK_{OES}(f_x) = \frac{FPK_{eye}(f_e)}{MPF_D(f_x)M_{OS}(f_x)M_{MPV}(f_x)} \times \left( 1 + \frac{\alpha\sigma QH(f_x)_{gor}}{L^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (27)$$

где  $L$  — средняя яркость дисплея;  $FPK_{eye}$  — ФПК глаза наблюдателя при наблюдении за экраном;  $QH(f_x)_{gor}$  — горизонтальная шумовая полоса для одномерной синусоидальной тестовой миры при расчете  $FPK_{OES}(f_x)$ ;  $MPF_D(f_x)$ ,  $M_{OS}(f_x)$ ,  $M_{MPV}(f_x)$  — модуляционно передаточная функция дисплея, оптической системы и матричного приемника,  $\sigma$  — среднее квадратическое значение шума дисплея;  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности.

### Заключение

Многоканальные системы обнаружения находятся в процессе постоянной доработки и совершенствования. Стремление в любых условиях съемки получить изображение, близкое к идеальному, приводит к поиску новых решений. Поэтому первостепенной задачей является поиск методов их достижения.

В дальнейшем планируется провести ряд исследований, связанных с данной темой. Поставить опыты по наблюдению целей МОЭСН в разных условиях с дальнейшим комплексированием полученных изображений. Проанализировать объективное оценивание изображений наблюдателем и выделение релевантных признаков в данных изображениях.

Методика оценки эффективности функционирования МОЭСН с комплексированием информации сочетает такую потребительскую характеристику ОЕСС, как вероятность обнаружения, распознавания и идентификации, с показателем качества комплексированного изображения — показателем успешности выполнения задания. Этот показатель дает возможность учесть особенности прохождения сигнала через все звенья информационного комплекса «фоново-целевая обстановка — МОЭСН— оператор», особенности процесса комплексирования изображений и зрительного восприятия изображения оператором.

Методика дает возможность выбирать наилучший для данных условий функционирования МОЭСН метод комплексирования. Исследования, проведенные в этой области, показывают, что явления поляризации излучения открывают ряд возможностей для определения многих характеристик, в том числе и формы поверхности в частности для металлов, сплавов, конструкционных материалов и других непрозрачных веществ, и сред.

Литература

1. R.H. Vollmerhausen, E. Jacobs, R.G. Driggers New metric for predicting target acquisition performance // Optical Engineering – 2004 – № 43 (11) – 2806–2818 с.
2. Рибалко М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. Оцінка показників якості комплексованих зображень в двоканальних ОЕСС // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2011. – № 4. – С. 57–62.
3. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
4. Колобродов В.Г., Микитенко В.І. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: Монографія – К.: «Аверс», 2013. – 178 с.
5. Murray Loew, James Bonick, Clarence Walters Image Fusion for Human Observers: How Should We Choose the Method?// RDECOM, CERDEC, Night Vision and Electronic Sensors DirectorateFort Belvoir, VA 22060
6. В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, М.С. Мамута Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – № 6. – С.127–131.
7. Y. Aron, Y. Gronau Polarization in the LWIR – a method to improve target acquisition ELOP // Thermal imaging business unit, P.O. Box 1165, Rehovot 76111 internet site: <http://www.el-op.co.il>
8. Овсов Д. А., Москалец О. Д., Москалец Д. О., Вершинина А. С. Способ определения поляризационных характеристик среды распространения высокочастотных сигналов – П. RU2533789
9. М. Борн, Э. Вольф Основы оптики [Текст] / 2-е изд., пер. с англ. под ред. Г. П. Мотулевич. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
10. Тевяшов В.И., Тымкул В.М., Шуба Ю.А., Измерение матриц рассеяния тел с использованием зеркальной сферы в качестве образца [Текст] // ОМП, 1979. – № 8. – С. 11–12.
11. Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур //: Наука, 1982. – 296 с.
12. Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учебник для вузов // Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
13. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Кудряшов К.В., Отражение оптического излучения телами с направленно-рассеивающим покрытием // Изв. Вузов. Приборостроение, 2007. Т. 50, № 10 – С. 58–63.
14. Якушенков Ю.Г., Теория и расчет ОЭП / М.: Логос, 2011. – 444 с.
15. Кизель, В.А. Отражение света // М.: Наука, 1973. – 353 с.
16. Фесько Ю.А. Разработка и исследование оптико-электронных методов определения трехмерной формы объектов.
17. В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, М.И. Ананич, П.Г. Голубев, С.Г. Смагин А.С. Способ тепловизионного распознавания формы объектов [Текст]. № 166727, МКИ Н04N5/33. – № 4738971/09; заявл. 06.06.89; опубл.