УДК 621.384.326.23

К ВОПРОСУ О ДАЛЬНОСТИ ОПОЗНАВАНИЯ В НИЗКОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Н. Ф. Кощавцев, А. Н. Кощавцев, С. Ф. Федотова
Государственное унитарное дочернее предприятие "Специальное конструкторское бюро техники ночного видения", Москва, Россия

Проведен анализ параметров элементов низкоуровневых систем, определяющих дальность опознавания объектов наблюдения. Показано, что увеличение дальности опознавания при низких уровнях освещенности возможно за счет улучшения энергетических параметров элементов системы, а при высоких уровнях освещенности — за счет повышения разрешающей способности системы.

Наиболее распространенными низкоуровневыми системами, формирующими изображение для визуального наблюдения, являются приборы ночного видения (ПНВ) на электронно-оптических преобразователях (ЭОП). При низких уровнях освещенности на местности ($E < 1\cdot10^{-3}$ лк) разрешающая способность ПНВ полностью определяется флуктуациями в потоке носителей информации. Учитывая, что квантовая эффективность фотокатодов ниже единицы, при низких уровнях освещенности разрешающая способность ПНВ ограничивается флуктуациями в потоке фотоэлектронов. В этом случае угловое разрешение ПНВ будет определяться следующим соотношением:

$$\alpha = \left[\frac{16k^2 e(2+K)}{K^2}\,\frac{(1+\chi)(1+\delta_{об})K_а}{\beta_ф E\,SA\tau^А d_{вх}^2 \tau_{об}\theta_э}\right]^{0,5},$$

где k — отношение сигнал-шум;
e — заряд электрона;
K — контраст объект — фон в плоскости фотокатода;

$$K = \frac{K_о \tau^А}{(\tau^А + L_Д / L_ф)(1 + L_{ро} / (L_ф \tau^А + L_Д))},$$

где $K_о$ — контраст объект —фон в плоскости объекта;
$\tau^А$ — пропускание атмосферы толщиной Д;
$L_Д$ — яркость атмосферной дымки толщиной Д;
$L_ф$ — яркость фона;
$L_{ро}$ — яркость в плоскости фотокатода, образованная рассеянием света в объективе;
χ — коэффициент, учитывающий темновую яркость ЭОПа;

$$\chi = 4\frac{j}{\pi\beta_ф L_ф K_а S(1+\delta_{об})O^2},$$

где A — актиничность, учитывает разницу в спектральном составе типового и реального источников и приемников излучения;
j — плотность темнового тока;
$\beta_ф$ — коэффициент яркости фона;
S — интегральная чувствительность фотокатода к источнику "А";
О — относительное отверстие объектива;
$K_а$ — коэффициент, учитывающий яркость атмосферной дымки;

$$K_а = 1 + (1/\beta_ф b)(1/\tau^А - 1),$$

где b — коэффициент светлоты; $b = L_н / K_{нг}$;

$L_н$ — яркость неба;

$L_{нг}$ — яркость неба у горизонта;

$d_{вх}$ — световой диаметр входного объектива;

$\tau_{об}$ — интегральный коэффициент пропускания объектива;

$\theta_э$ — время накопления информации, определяется временными характеристиками ЭОПа и зрительного анализатора.

Дальность опознавания определяется разрешением элемента разложения на объекте при вероятности опознавания $P(Д_о) = 0{,}5$.

$$Д_о = a/\alpha, \tag{1}$$

где a — размер элемента разложения объекта наблюдения, обеспечивающий опознавание объекта. По данным экспериментальных наблюдений, для опознавания автомобиля размер элемента разложения составляет 0,42 м.

Распределение вероятности реализации дальности опознавания определяется следующим выражением:

$$P(Д) = 1 - \int_0^{Д} f_Д(Д) dД,$$

где $f_Д(Д)$ — дифференциальный закон распределения дальности опознавания,

$$f_Д(Д) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma_\alpha Д^2} \exp\left[1 - \frac{(a / Д - a / Д_о)}{2\sigma_\alpha^2}\right],$$

где σ_α — среднеквадратичное отклонение углового разрешения ПНВ;

Интегральный закон распределения вероятности опознавания представляет собой вероятность обеспечения дальности опознавания:

$$F_Д(Д) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma_\alpha} \int_0^{Д} \exp\left[1 + \frac{a^2}{2\sigma_\alpha^2 Д_о^2}(Д_о / Д - 1)\right]^2 \frac{dД}{Д^2}.$$

Для конкретного ПНВ при решении задачи опознавания объекта величины a и σ являются постоянными, а распределение вероятности дальности опознавания полностью определяется величиной $Д_о$. При небольших дальностях опознавания, которые реализуются при малых величинах контраста ($K << 1$) и высоких прозрачностях атмосферы ($\tau^Д = 1$, $K_а = 1$) Д может быть представлена в следующем виде:

$$Д_о = \text{const}\, aK(\beta_ф\, E\, S\, d_{вх}^2\, \tau_{об}\, \theta_э)\,. \tag{2}$$

Из выражения (2) видно, что при низких уровнях освещенности дальность опознавания ограничивается лишь флуктуациями в потоке фотонов. Дальность опознавания определяется параметрами, обеспечивающими его энергетику (освещенность на местности, коэффициент яркости фона, чувствительность фотокатода ЭОП, диаметр входного отверстия объектива и его пропускание, время накопления). Следовательно, обработка изображения с целью повышения дальности опознавания может осуществляться за счет увеличения времени накопления ($Д_о = \theta_э$).

При высоких уровнях освещенности ($E > 1 \cdot 10^{-3}$ лк) угловое разрешение определяется разрешением элементов, формирующих систему визуализации, а также флуктуационной составляющей углового разрешения. Если аппроксимировать передаточные характеристики элементов системы гауссоидами, то суммарная составляющая углового разрешения будет определяться суммой квадратов угловых разрешений элементов системы. Тогда при высоком уровне освещенности и достаточно высоком коэффициенте преобразования ограничение разрешающей способности органом зрения можно не учитывать. В этом случае угловое разрешение системы можно представить следующим соотношением:

$$\alpha_{\Sigma}^{2} = \alpha_{\text{стр}}^{2} + \alpha_{\text{фл}}^{2},$$

где $\alpha_{\text{стр}}$ — структурная составляющая углового разрешения оптико-электронного прибора.

Для прибора ночного видения структурная составляющая углового разрешения определяется структурными несовершенствами объектива, электронно-оптического преобразователя и окуляра, объектива, электронно-оптического преобразователя и окуляра.

$$\alpha_{\text{стр}}^{2} = \alpha_{\text{об}}^{2} + \alpha_{\text{эоп}}^{2} + \alpha_{\text{ок}}^{2} = \frac{\text{const}}{f_{\text{об}}^{2}}[1 / N_{\text{об}}^{2} + 1 / N_{\text{эоп}}^{2}\Gamma_{\text{э}}^{2} + 1 / N_{\text{ок}}^{2}\Gamma_{\text{э}}^{2}],$$

где $f_{\text{об}}$ — фокусное расстояние объектива;

$N_{\text{об}}$, $N_{\text{эоп}}$, $N_{\text{ок}}$ — разрешающие способности объектива, ЭОП и окуляра, соответственно;

Гэ — электронно-оптическое увеличение ЭОПа.

Дальность опознавания объекта будет определяться соотношением, аналогичным соотношению (1):

$$Д_{\text{о}} = \frac{a}{\sqrt{\alpha_{\text{об}}^{2} + \alpha_{\text{эоп}}^{2} + \alpha_{\text{ок}}^{2} + \alpha_{\text{фл}}^{2}}}.$$

Обычно разработка оптико-электронных систем ведется таким образом, чтобы $N_{\text{об}}$, $N_{\text{ок}} >> N_{\text{эоп}}$. В частном случае, когда освещенность достаточно большая, $\alpha_{\text{фл}} << \alpha_{\text{эоп}}$, поэтому оценить дальность опознавания можно по формуле

$$Д_{\text{о}} \sim \text{const}\ a f_{\text{об}} N_{\text{эоп}} \Gamma_{\text{э}}.$$

Из этого соотношения следует, что дальность опознавания будет расти пропорционально разрешающей способности ЭОПа, пока будет сохраняться условие $N_{\text{об}}$, $N_{\text{ок}} >> N_{\text{эоп}}$ (на практике в три—пять раз). Разрешающая способность ЭОП определяется его передаточной (частотно-контрастной) характеристикой. Для увеличения дальности действия такой системы необходимо за счет обработки изображения улучшать частотно-контрастную характеристику ЭОПа. Введение обработки изображений особенно важно в низкоуровневых системах с преобразованием сигналов в электрический сигнал (низкоуровневые телевизионные системы с ЭОПом на входе).

Обработка изображений в низкоуровневых системах целесообразна лишь при достаточно высоком уровне освещенности. При низких уровнях освещенности повышение дальности опознавания возможно лишь за счет улучшения энергетических характеристик системы.

ABOUT THE RECOGNITION RANGE IN LOW-LIGHT-LEVEL VISUALIZATION SYSTEM

N. F. Koshchavtsev, A. N. Koshchavtsev, S. F. Fedotova
Special Design Office of Night Vision Devices, Moscow, Russia

It is showed that when a low-light-level the rising of the low-light-level system recognition range is possible by the improvement of the system elements energetic parameters, and when a high-light-level the same is possible by the rising of system resolution.