

УДК 62-50

Методика вероятностного анализа процесса наблюдения в цифровых телевизионных системах видимого диапазона

А.Л. Воробьев, Ю.П. Журик, А.М. Краснов, С.Н. Шашков

Аннотация

Проведен анализ основных задач наблюдения с помощью цифровой телевизионной системы наблюдения. Предложено обобщение результатов различных подходов в виде единой вероятностной методики анализа задачи наблюдения и обнаружительных характеристик цифровой телевизионной системы наблюдения.

Ключевые слова

оптико-электронная система; частотно-контрастная характеристика; наблюдение; обнаружение; распознавание; идентификация.

Введение

Методики анализа процесса наблюдения и оценки на их основе обнаружительных характеристик оптико-электронных систем (ОЭС) имеют важное значение при проектировании, испытаниях, а также при планировании использования ОЭС в операциях связанных с риском для персонала. Последний класс задач успешно решается с использованием доступного в настоящее время компактного метеорологического оборудования и расчетных программ, позволяющих с высокой степенью достоверности прогнозировать характер распространения излучения в атмосфере.

При наблюдении с помощью ОЭС основными визуальными задачами являются:

- обнаружение объектов;
- распознавание объектов.

Тактическими характеристиками задачи наблюдения являются:

- дальность обнаружения (расознавания) объектов;
- время обнаружения (расознавания) объектов.

В ряде работ распознавание объектов называется идентификацией и детализируется. Так в США принято четыре степени идентификации объектов:

- общая идентификация (определение класса цели, например, самолет, автомобиль);
- точная идентификация (определение типа цели внутри класса, например, самолет-истребитель, грузовой автомобиль);
- описательная идентификация (определение размеров, конфигурации, расположения элементов цели, например, истребитель Су-27);
- технический анализ (анализ элементов цели, например, истребитель Су-27СМ).

Как правило, при применении авиационных оптико-электронных визирных систем ударных летательных аппаратов для наблюдения объектов и их атаки вполне достаточна реализация первых двух степеней идентификации. Остальные степени идентификации могут реализовываться при разведке целей.

Иногда применяют три уровня восприятия изображения объекта:

- обнаружение (выделение пятна, соответствующего объекту, на окружающем фоне);
- распознавание (выделение объекта с достаточной ясностью и отнесение его к определенному классу);
- идентификация (выделение объекта с достаточной ясностью и отнесение его к определенному типу внутри класса).

Важнейшими факторами, влияющими на решение задачи наблюдения в оперативной обстановке с помощью оптико-электронных средств являются:

- качество изображения объекта, получаемого на экране монитора;
- объем информации, известный априори и позволяющий выделить объект из окружающего фона (сигнатура объекта);
- степень подготовки оперативного персонала, ведущего наблюдение.

Сигнатура потенциальных объектов наблюдения, условия наблюдения (состояние атмосферы, параметры движения платформы наблюдения и т.д.) и требуемые тактические характеристики (дальность и время обнаружения (распознавания) определяют параметры ОЭС наблюдения, а степень подготовки оперативного персонала и условия наблюдения – интерфейс ОЭС.

Очевидно, что чем более детально известно отличие объекта от окружающего фона, тем более оперативно он может быть обнаружен, при условии сбора прибором наблюдения необходимого объема информации.

При наблюдении значительно удаленных объектов важнейшими факторами, определяющими качество изображения, становятся молекулярное, аэрозольное поглощение и рассеяние излучения, турбулентное искажение и рефракция. Часто определяющими факторами при наблюдении являются атмосферные осадки, туман, естественные помехи (листва деревьев, сложный фон), маскировка, использование ложных объектов.

Бурный прогресс микроэлектроники, технологии фотоприемных устройств и средств отображения информации привел к ситуации, когда при наблюдении в нормальных погодных условиях часто главным ограничивающим фактором становятся характеристики визуальной системы наблюдателя.

Сегодня совершенно очевидно, что определение тактических характеристик ОЭС должно осуществляться с учетом перечисленных выше факторов: сигнатурных характеристик объекта наблюдения и фона, характеристик атмосферы, как тракта передачи оптического сигнала, характеристик прибора наблюдения, визуальной системы наблюдателя и условий наблюдения.

Анализ же современных отечественных публикаций, посвященных данной проблеме, и методик полевых испытаний показывает отсутствие единого подхода и использование устаревших методик на основе оценок минимального разрешаемого контраста (или минимальной разрешаемой разности температур для ИК систем), которые допустимы при лабораторных сравнительных испытаниях. Данная ситуация приводит к трудностям сравнительного анализа различных систем наблюдения, оценки характеристик ОЭС на разных этапах их создания и успешной их эксплуатации.

В данной работе предлагается обобщение результатов различных подходов в виде единой методики анализа задачи наблюдения и обнаружительных характеристик ОЭС.

Постановка задачи

Схематично наблюдение объектов с помощью ОЭС можно представить в виде, показанном на рисунке 1.

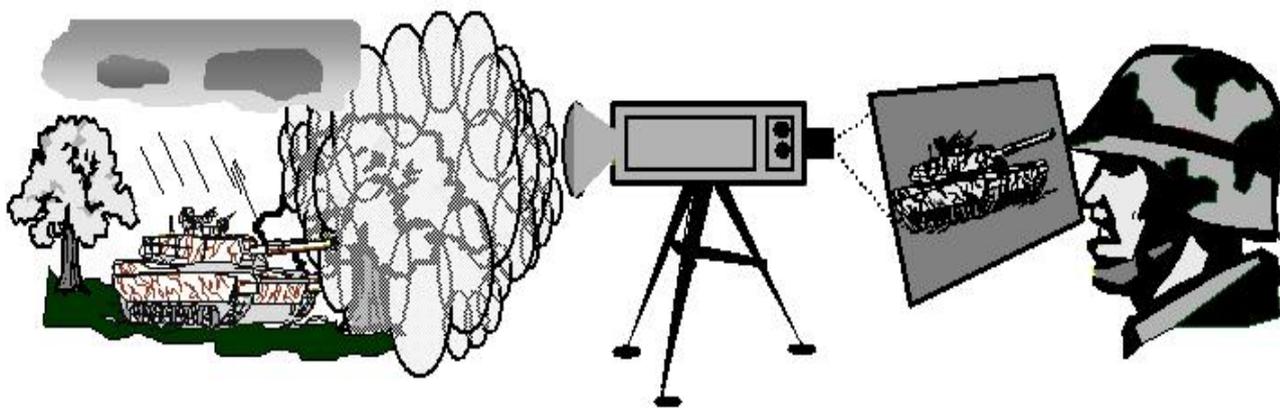


Рисунок 1 – Схема наблюдения объектов с помощью ОЭС

Дальность наблюдения зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- характеристики объекта наблюдения;
- характеристики сред распространения принимаемого ОЭС излучения;
- характеристики ОЭС.

Поскольку процесс наблюдения зависит от ряда случайных факторов и является стохастическим, необходим критерий, позволяющий с определенной степенью достоверности говорить об успешном выполнении задачи наблюдения [1].

Впервые такой критерий был сформулирован и развит Джонсоном в 1957 г. Суть критерия состоит в том, что выделено несколько уровней восприятия изображения, нижний из которых (соответствующий обнаружению объекта) соответствует выделению какого-то размытого пятна на фоне помех, а высший уровень соответствует точной идентификации объекта и определению его специфических особенностей. Между этими уровнями находится ряд промежуточных уровней восприятия. В качестве параметра, характеризующего возможный уровень восприятия изображения, используют разрешение штриховых мир, эквивалентных объекту наблюдения. При этом предполагается, что объект характеризуется неким минимальным (критическим) размером вдоль которого ведется анализ его изображения, с целью выявления характерных геометрических признаков объекта. Эквивалентной штриховой мирой называют миру прямоугольной формы, ширина которой равна минимальному (критическому) размеру объекта, а длина соответствует его размеру в направлении, перпендикулярном критическому. Джонсон на примере наблюдения военных транспортных средств провел сравнение способности наблюдателя разрешать изображение мир с его способностью воспринимать объект с различным качеством видения. Результатом таких экспериментальных исследований явилась разработка критериев Джонсона, представляющих собой соответствие между числом разрешаемых периодов (циклов) эквивалентной мирой, укладывающихся на

критическом размере наблюдаемого объекта, и уровнем видения. Один период (цикл) эквивалентной миры содержит два штриха равной толщины – темный и светлый.

Джонсон произвольно разделил решение задачи наблюдения на четыре уровня восприятия изображения объекта: обнаружение, ориентация, распознавание и идентификация. Результаты, полученные Джонсоном, приведены в таблице 1.

Впоследствии данные, полученные Джонсоном, были откорректированы (таблица 2) [2], в результате чего был получен стандарт промышленности для одномерного восприятия изображения объекта. Поскольку значения стандарта были основаны на работе Джонсона, они стали называться критериями Джонсона (N_{50}), хотя значения N_{50} не соответствуют значениям, полученные Джонсоном. Существует расширенная таблица значений критерия Джонсона, которая приведена в работе [2].

Таблица 1.

Уровень восприятия изображения объекта	Описание уровня восприятия изображения объекта	Число периодов (циклов)
Обнаружение	Выделение пятна, соответствующего объекту, на фоне помех	$1,0 \pm 0,025$
Ориентация	Объект является, приблизительно, симметричным или несимметричным, и определяется его ориентация (боковая или лобовая).	$1,4 \pm 0,35$
Распознавание	Объект различается с достаточной ясностью, чтобы определить его класс (танк, автомобиль, человек)	$4,0 \pm 0,8$
Идентификация	Объект различается с достаточной ясностью, чтобы определить его тип (например, танк Т-52)	$6,4 \pm 1,5$

Таблица 2.

Уровень восприятия изображения объекта	Описание уровня восприятия изображения объекта	Число периодов (циклов) N_{50}
Обнаружение	Выделение пятна, соответствующего объекту, на фоне помех	1,0
Объект	Перекрестие прицела совмещено с объектом с достаточной точностью, для того чтобы осуществить пуск ракеты	2,5
Распознавание	Объект различается с достаточной ясностью, чтобы определить его класс (танк, автомобиль, человек)	4,0
Идентификация	Объект различается с достаточной ясностью, чтобы определить его тип внутри класса (например, танк Т-52)	8,0

Величина N_{50} определяет количество периодов эквивалентной миры, разрешаемых наблюдателем, для данного уровня восприятия с вероятностью 0,5. Для оценки других величин вероятности восприятия вычислены множители (таблица 3) для пересчета вероятности восприятия [2]. Из приведенной информации наглядно видно, что, например, для идентификации объекта с вероятностью 0,95 необходимо, чтобы на его критическом размере уложилось $8 \times 2 = 16$ периодов эквивалентной миры.

Таблица 3.

Вероятность восприятия	1,0	0,95	0,80	0,5	0,30	0,10	0,02	0
Множитель	3,0	2,0	1,5	1,0	0,75	0,50	0,25	0

Эмпирическая формула определения вероятности успешного выполнения задачи наблюдения имеет вид [2]

$$P(N) = \frac{\left(\frac{N}{N_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N}{N_{50}}\right)^E};$$

$$E = 2,7 + 0,7 \left(\frac{N}{N_{50}}\right),$$

где N - число циклов, приходящихся на критический размер цели.

Однако в работе [3] указано, что основным недостатком при экспериментальном определении N_{50} является то, что наблюдатель при решении задачи наблюдения мог случайно решить её положительно и, следовательно, не ясно, как значения N_{50} (таблица 2) были приняты достоверными. Поэтому была предложена другая эмпирическая формула определения вероятности успешного выполнения задачи наблюдения:

$$P(N) = \frac{\left(\frac{V}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{V}{V_{50}}\right)^E};$$

$$E = 1,51 + 0,24 \left(\frac{V}{V_{50}}\right),$$

где V, V_{50} имеют такой же физический смысл, что и N, N_{50} . Отличие V_{50} от N_{50} заключается в том, что величина V_{50} учитывает шанс случайного положительного решения задачи наблюдения. Учитывая, что для задач распознавания и идентификации значения N_{50} были получены экспериментально в течение многих лет, в работе [3] была предложена формула пересчета N_{50} в V_{50}

$$V_{50} = 2,7k_c N_{50}.$$

Значения коэффициента k_c приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Число целей	3	4	5	6	8	10	12	20
Коэффициент k_c	1,79	1,43	1,30	1,23	1,16	1,12	1,10	1,05

Прямая задача анализа процесса наблюдения формулируется следующим образом.

Дано:

- характеристики объекта наблюдения;
- характеристики сред распространения принимаемого ОЭС излучения;
- характеристики ОЭС;
- дальность наблюдения.

Требуется определить вероятность успешного выполнения задачи наблюдения на данной дальности наблюдения.

Обратная задача анализа процесса наблюдения формулируется так.

Дано:

- характеристики объекта наблюдения;
- характеристики сред распространения принимаемого ОЭС излучения;
- характеристики ОЭС;
- вероятность успешного выполнения задачи наблюдения.

Требуется определить дальность наблюдения с заданной вероятностью.

Решение задачи

Рассмотрим решение прямой задачи анализа процесса наблюдения, то есть определение вероятности успешного выполнения задачи наблюдения $P(N)$ на данной дальности наблюдения применительно к цифровой телевизионной системе (ТВС).

Данная вероятность определяется следующим образом [3]:

$$P(N) = \frac{\left(\frac{V}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{V}{V_{50}}\right)^E};$$

$$E = 1,51 + 0,24 \left(\frac{V}{V_{50}}\right).$$

Число циклов, приходящихся на критический размер цели V определяется по формуле:

$$V = \frac{\sqrt{A_{ц}}}{D} F_{ц},$$

где $A_{ц} = X_{ц}Y_{ц}$ - площадь цели, $X_{ц}, Y_{ц}$ - ширина и высота цели соответственно, D - дальность цели, $F_{ц}$ - пороговая частота, приведенная к характеристикам цели и условий наблюдения.

Пороговая частота, приведенная к характеристикам цели и условий наблюдения определяется следующим образом [3]:

$$F_{ц} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \sqrt{\frac{K_{зп}}{S_{п}(\omega)}} d\omega,$$

где $K_{зп}$ - значение контраста цели на входном зрачке ТВС; $S_{п}(\omega)$ - пороговая контрастно-частотная функция ТВС; ω - пространственная частота (циклы/мрад) в пространстве предметов; ω_1, ω_2 - значения пространственной частоты в пространстве предметов в точках пересечения $K_{зп}$ с $S_{п}(\omega)$ (рисунок 2).

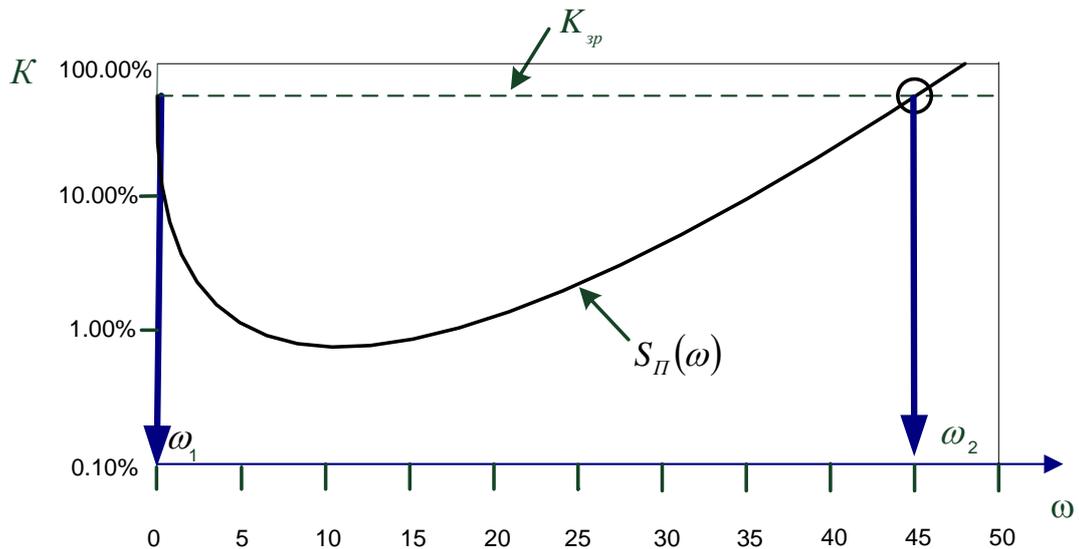


Рисунок 2 – К определению пороговой частоты $F_{ц}$, приведенной к характеристикам цели и условий наблюдения

Контраст цели на входном зрачке ТВС $K_{зп}$ определяется по формуле [2]:

$$K_{зп} = \frac{K_{ц}}{1 + \chi \left(\frac{1}{\bar{\tau}_c} - 1 \right)},$$

$K_{ц}$ - контраст цели; χ - коэффициент, характеризующий отношение яркости трассы наблюдения к яркости фона (отношение небо-земля); $\bar{\tau}_c$ - среднее значение коэффициента пропускания атмосферы.

Среднее значение χ принимают равным 3. Некоторые значения коэффициента χ приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Небо	Земля	χ
ясно	снег (чистый)	0,2
ясно	пустыня	0,4
ясно	лес	5
сплошная облачность	снег (чистый)	1
сплошная облачность	пустыня	7
сплошная облачность	лес	25

Среднее значение коэффициента пропускания $\bar{\tau}_c$ определяется по формуле [4, 2]:

$$\bar{\tau}_c = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda, T)}{\partial T} \tau_c^D(\lambda) \eta(\lambda) \Delta \lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda, T)}{\partial T} \eta(\lambda) \Delta \lambda};$$

$$m_e(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1};$$

$$\frac{\partial m_e(\lambda, T)}{\partial T} = m_e(\lambda, T) c_2 e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \left[\lambda T^2 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right) \right]^{-1};$$

$$\eta(\lambda) = \frac{\lambda}{\lambda_2},$$

где $m_e(\lambda, T)$ - спектральная плотность энергетической светимости цели; $c_1 = 3,7418 \times 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$; $c_2 = 1,4388 \text{ м} \cdot \text{К}$; $T = 5800 \text{ К}$ - температура Солнца; $\eta(\lambda)$ - относительная спектральная чувствительность приемника излучения; λ_1, λ_2 - границы диапазона спектра, в котором работает ТВС (мкм, например $\lambda_1 = 0,4 \text{ мкм}$ $\lambda_2 = 0,7 \text{ мкм}$); $\tau_c^D(\lambda)$ - спектральный коэффициент пропускания атмосферы при заданной дальности цели D , вычисленный, например, с использованием модели MODTRAN [5]; λ - длина волны излучения.

Пороговая контрастно-частотная функция ТВС $S_{II}(\omega)$ вычисляется по формуле [2, 3]:

$$S_{II}(\omega) = \frac{S_r(\omega_r)}{K(\omega)} \sqrt{\frac{1}{k_m^2} + 169,6^2 \frac{\sigma^2}{L_m^2}};$$

$$\omega_r = \frac{17,45\omega}{\gamma},$$

где ω_r - частота (циклы/угл. градус) в пространстве изображений; $S_r(\omega_r)$ - пороговая контрастно-частотная функция глаза наблюдателя (оператора); $K(\omega)$ - частотно-контрастная характеристика ТВС; σ^2 - воспринимаемая глазом наблюдателя дисперсия шума яркости изображения, обусловленная шумом системы [3]; L_m - яркость монитора ($\text{кд}/\text{м}^2$); k_m - коэффициент, учитывающий изменение контраста на мониторе; γ – угловое увеличение.

Угловое увеличение γ может быть определено двумя вариантами.

Первый вариант применяется при наблюдении цели по монитору в динамике, когда формат изображения монитора полностью соответствует формату изображения приемника излучения (например, телевизионной камере).

Второй вариант применяется при обработке статического изображения, когда, как правило, размер формат изображения приемника больше формата изображения монитора (например, изображение цифрового фотоаппарата).

Угловое увеличение γ для первого варианта определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{\text{tg}\alpha_r}{\text{tg}\alpha} \gamma_3;$$

$$\text{tg}\alpha_r = \text{tg}\left(\frac{X_m}{d}\right),$$

где α - горизонтальное угловое поле ТВС в пространстве предметов; X_m - ширина монитора; d - расстояние от монитора до глаза оператора; γ_3 - электронное увеличение; α_r - горизонтальное угловое поле монитора.

Во втором варианте угловое увеличение γ определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{\text{tg}\alpha_{цр}}{\text{tg}\alpha_{ц}},$$

где $\alpha_{ц}$ - угловой размер цели в пространстве предметов; $\alpha_{цр}$ - угловой размер цели в пространстве изображений.

Значения $\text{tg}\alpha_{ц}$ и $\text{tg}\alpha_{цр}$ вычисляются следующим образом:

$$\text{tg}\alpha_{ц} = \text{tg}\left(\frac{X_{ц}}{D}\right);$$

$$\text{tg}\alpha_{цр} = \text{tg}\left(\frac{x_{ц}}{d}\right),$$

где $x_{Ц}$ - ширина изображения цели на мониторе оператора (см); d - расстояние от монитора до оператора (см); $X_{Ц}$ - ширина цели; D - дальность цели.

Выражение для линейного размера изображения цели на мониторе $x_{Ц}$ имеет вид

$$x_{Ц} = x_{Ц\delta} \delta \gamma_{\delta} \cdot 10^{-4};$$

$$\gamma_{\delta} = \frac{x_{k\delta t}}{x_{k\delta}},$$

где $x_{Ц\delta}$ - линейный размер изображения цели на приемнике излучения в пикселях; δ_m - размер пикселя монитора оператора (мкм); γ_{δ} - коэффициент, учитывающий электронное увеличение; $x_{k\delta t}$ - текущий горизонтальный размер кадра в пикселях; $x_{k\delta}$ - формат монитора в пикселях по горизонтали.

Определение размера пикселя монитора δ_m в мкм осуществляется по формуле:

$$\delta_m = 10^3 \frac{\sqrt{X_m^2 + Y_m^2}}{\sqrt{X_{m\delta}^2 + Y_{m\delta}^2}},$$

где X_m, Y_m - размеры монитора по горизонтали и вертикали (мм) соответственно; $X_{m\delta}, Y_{m\delta}$ - размеры монитора по горизонтали и вертикали (пиксель).

Линейный размер изображения цели на приемнике излучения $x_{Ц\delta}$ в пикселях вычисляется следующим образом:

$$x_{Ц\delta} = \frac{x_{Ц}}{\delta};$$

$$x_{Ц} = \frac{f' X_{Ц}}{D} 10^3;$$

$$\delta = 10^3 \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x_{\delta}^2 + y_{\delta}^2}},$$

где $x_{Ц}$ - линейный размер изображения цели на приемнике излучения (мкм); δ - размер пикселя приемника излучения (мкм); f' - фокусное расстояние (мм); x, y - размеры приемника излучения по горизонтали и вертикали (мм); x_{δ}, y_{δ} - размеры приемника излучения по горизонтали и вертикали (пиксель).

Пороговая контрастно-частотная функция глаза наблюдателя $S_{\Gamma}(\omega_{\Gamma})$ имеет следующий вид [2, 6]:

$$S_{\Gamma}(\omega_{\Gamma}) = \begin{cases} \frac{a}{b\omega_{\Gamma}e^{-c\omega_{\Gamma}}\sqrt{1+0,06e^{c\omega_{\Gamma}}}}, \\ 1, & \text{если } S(\omega_{\Gamma}) > 1 \end{cases}$$

где

$$a = 1 + \frac{12}{S_m \left(1 + \frac{\omega_{\Gamma}}{3}\right)^2}; \quad b = \frac{540}{\left(1 + \frac{0,7}{L_m}\right)^{0,2}}; \quad c = 0,3 \left(1 + \frac{100}{L_m}\right)^{0,15}; \quad S_m = 57,3 \frac{\sqrt{A_m}}{d},$$

A_m - площадь монитора.

Для пороговой контрастно-частотной функции глаза наблюдателя $S_{\Gamma}(\omega_{\Gamma})$ справедливо соотношение:

$$S_{\Gamma}(\omega_{\Gamma}) = \frac{1}{K_k(\omega_{\Gamma})},$$

где $K_k(\omega_{\Gamma})$ - функция чувствительности контраста.

Частотно-контрастная характеристика $K(\omega)$ зависит от схемы построения ТВС и определяется задачей её исследования. Рассмотрим ТВС, структурная схема которой показана на рисунке 3.

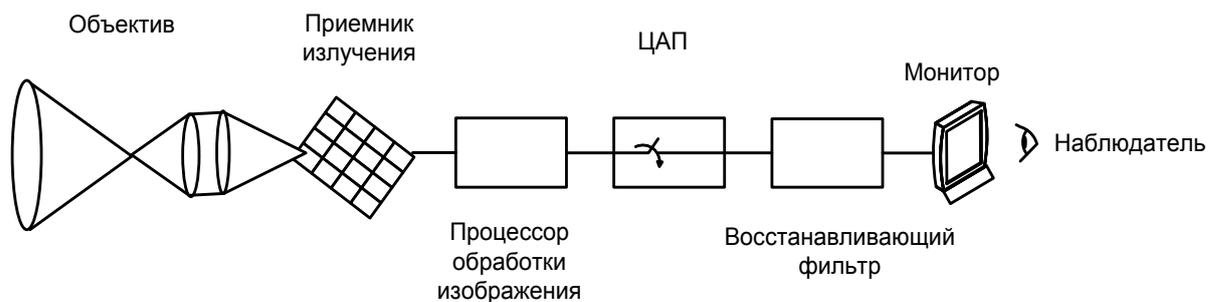


Рисунок 3 - Структурная схема телевизионной системы

Выражение частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) $K(\omega)$ для данной структуры ТВС имеет следующий вид [2]:

$$K(\omega) = K_o(\omega)K_{\text{III}}(\omega)K_{\text{oc}}(\omega)K_{\text{кв}}(\omega)K_{\phi}(\omega)K_m(\omega),$$

где $K_o(\omega)$ - ЧКХ оптической системы ТВС, $K_{\text{III}}(\omega)$ - ЧКХ приемника излучения ТВС, $K_{\text{oc}}(\omega)$ - ЧКХ, учитывающая механические движения как самой ТВС, так и её элементов

сканирования, $K_{кв}(\omega)$ - ЧКХ квантования сигнала по времени, $K_{\phi}(\omega)$ - ЧКХ восстанавливающего фильтра, $K_{м}(\omega)$ - ЧКХ отображающего устройства (монитора) ТВС.

Частотно-контрастная характеристика оптической системы ТВС $K_o(\omega)$ зависит от дифракции излучения на элементах оптической системы, от aberrаций оптической системы, от качества фокусировки изображения оптической системой на приемнике излучения ТВС. С учетом перечисленных факторов ЧКХ оптической системы $K_o(\omega)$ определяется по формуле:

$$K_o(\omega) = K_{од}(\omega)K_{оа}(\omega)K_{ор}(\omega),$$

где $K_{од}(\omega)$ - ЧКХ дифракции излучения на элементах оптической системы, $K_{оа}(\omega)$ - ЧКХ aberrаций оптической системы ТВС, $K_{ор}(\omega)$ - ЧКХ, учитывающая расфокусировку изображения оптической системой на приемнике излучения ТВС с фиксированным фокусным расстоянием.

Перечисленные частотно-контрастные характеристики оптической системы определяются следующим образом:

$$K_{од}(\omega) = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_{ом}} \right) - \left(\frac{\omega}{\omega_{ом}} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{ом}} \right)^2} \right];$$

$$K_{оа}(\omega) = 1 - 0,1575 \left[1 - 4 \left(\frac{\omega}{\omega_{ом}} - 0,5 \right)^2 \right];$$

$$K_{ор}(\omega) \approx \frac{2J_1 \left(2\pi \frac{\omega}{\omega_{ом}} \left[1 - \frac{\omega}{\omega_{ом}} \right] \right)}{2\pi \frac{\omega}{\omega_{ом}} \left[1 - \frac{\omega}{\omega_{ом}} \right]};$$

$$\omega_{ом} = \frac{D_{зр}}{\lambda},$$

где $\omega_{ом}$ - предельная максимальная пространственная частота оптической системы (циклы/мрад); $D_{зр}$ - диаметр входного зрачка (мм), λ - длина волны (мкм), J_1 - функция Бесселя 1-го рода.

Если пространственная частота оптической системы ω больше предельной максимальной пространственной частоты $\omega_{ом}$, то все ЧКХ оптической системы обращаются в ноль, то есть:

$$K_o(\omega) = K_{од}(\omega) = K_{оа}(\omega) = K_{ор}(\omega) = 0, \text{ при } \omega > \omega_{ом}$$

При заданном диапазоне волн при определении ЧКХ оптической системы используется среднее значение длины волны $\lambda = \lambda_{cp} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$.

ЧКХ приемника излучения ТВС $K_{\text{ПИ}}(\omega)$ определяется по формуле:

$$K_{\text{ПИ}}(\omega) = \left| \frac{\sin\left(\pi \frac{\omega}{\omega_{\text{ПИм}}}\right)}{\pi \frac{\omega}{\omega_{\text{ПИм}}}} \right| = \left| \text{sinc}\left(\pi \frac{\omega}{\omega_{\text{ПИм}}}\right) \right|;$$

$$\omega_{\text{ПИм}} = \frac{1}{\alpha_{\delta}} = \frac{f'}{\delta_p},$$

где $\omega_{\text{ПИм}}$ - предельная максимальная пространственная частота приемника излучения (циклы/мрад), при $\omega > \omega_{\text{ПИм}}$, $K_{\text{ПИм}}(\omega) = 0$; δ_p - размер активного элемента пикселя приемника излучения; f' - заднее фокусное расстояние оптической системы, α_{δ} - угловой размер пикселя.

ЧКХ приемника излучения ТВС $K_{\text{ПИ}}(\omega)$ используется только совместно с частотно-контрастной характеристикой оптической системы $K_o(\omega)$.

Частотно-контрастная характеристика $K_{oc}(\omega)$, учитывает линейные, синусоидальные и случайные механические движения цели, ТВС и её элементов сканирования:

$$K_{oc}(\omega) = K_{\text{лин}}(\omega) K_{\text{син}}(\omega) K_{\text{сл}}(\omega),$$

где $K_{\text{лин}}(\omega)$ - ЧКХ, учитывающая линейное движение цели и изображения цели на приемнике излучения; $K_{\text{син}}(\omega)$ - ЧКХ, учитывающая движение элементов сканирования ТВС и воздействие механической вибрации на ТВС; $K_{\text{сл}}(\omega)$ - ЧКХ, учитывающая случайные движение цели, ТВС, её элементов сканирования и воздействие случайной механической вибрации на ТВС.

ЧКХ случайного движения $K_{\text{сл}}(\omega)$ может быть определена по формуле [2]:

$$K_{\text{сл}}(\omega) = e^{-2(\pi\sigma_{\text{сл}}\omega)^2},$$

где $\sigma_{\text{сл}}$ - среднее квадратическое отклонение случайных смещений.

Под случайным смещением понимается смещения с частотой более 100 Гц, так как смещения с частотой до 30 Гц глаз наблюдателя успевает отследить, а смещения от 30 до 100 Гц, учитываются в ЧКХ $K_{\text{лин}}(\omega)$ [2].

Если известна спектральная плотность мощности вибрации $s(\omega_g)$, то дисперсия случайных смещений определяется из соотношения:

$$\sigma_{cl}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} s(\omega_g) d\omega_g,$$

где ω_g - частота вибрации, мкрад²/Гц.

Если $s(\omega_g)$ неизвестна, то σ_{cl} часто принимают равным

$$\sigma_{cl} = (0,2...0,5) \alpha_\delta.$$

Следует заметить, что определение линейных δ_p и угловых α_δ размеров пикселя приемника излучения должно проводиться с учетом конкретной структуры приемной матрицы. Поскольку чувствительный элемент занимает лишь часть площади пикселя (рисунок 4), то необходимо учитывать так называемый коэффициент заполнения.

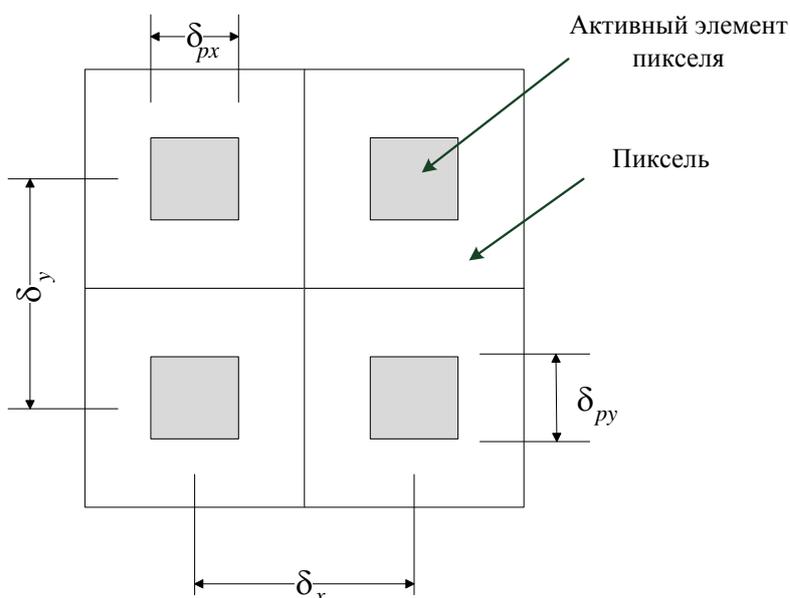


Рисунок 4 – Геометрические характеристики пикселя

Коэффициент заполнения указывается в спецификациях на приемники излучения. С учетом рисунка 4 формула для определения коэффициент заполнения имеет вид

$$\zeta = \frac{\delta_{px} \delta_{py}}{\delta_x \delta_y},$$

где δ_{px} , δ_{py} - размеры активного элемента пикселя по горизонтали и вертикали соответственно; δ_x , δ_y - размеры пикселя по горизонтали и вертикали соответственно.

Если известны размер пикселя δ , коэффициент заполнения ζ , то

$$\delta_p = \delta\sqrt{\zeta}.$$

При известном f' можно определить α_δ .

В случае, если известны δ_x , δ_y и ζ , и при этом $\delta_x = \delta_y$, $\delta_{px} = \delta_{py}$, то

$$\delta_{px} = \delta_x\sqrt{\zeta};$$

$$\delta_{py} = \delta_y\sqrt{\zeta}.$$

ЧКХ $K_{кв}(\omega)$, учитывающая квантование непрерывного сигнала по времени, определяется по формуле [2, 7]:

$$K_{кв}(\omega) = \left| \text{sinc}\left(\pi \frac{\omega}{\omega_s}\right) \right|;$$

$$\omega_s = \frac{N_{ex}}{\alpha} = \frac{N_{ex}f'}{N_x\delta_{px}} = \frac{k_{кв}}{\alpha_\delta},$$

где N_{ex} - число выборок поперек горизонтального углового поля ТВС в пространстве пред-

метов; N_x - число пикселей по горизонтали приемника излучения; $k_{кв} = \frac{N_{ex}}{N_x}$ - коэффициент

квантования (зависит от структуры ТВС и может принимать значения 1, 2, 4).

ЧКХ восстанавливающего фильтра $K_\phi(\omega)$ [2]:

$$K_\phi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\omega}{\omega_s}\right)^{2N}}},$$

где N – порядок фильтра Баттерворта.

ЧКХ отображающего устройства $K_M(\omega)$ [2]:

$$K_{Mx}(\omega) = \left| \text{sinc}\left(\pi \frac{\delta_M \alpha_x}{X_M \gamma_3} \omega\right) \right|;$$

$$K_{My}(\omega) = \left| \text{sinc}\left(\pi \frac{\delta_M \alpha_y}{Y_M \gamma_3} \omega\right) \right|,$$

где δ_M - размера пикселя монитора; α_x, α_y - горизонтальное и вертикальное угловое поле

ТВС в пространстве предметов соответственно; X_M, Y_M - размеры монитора по горизонтали

и вертикали соответственно; γ_3 - коэффициент, учитывающий электронное увеличение.

В том случае, если вместо монитора используется микромонитор, то необходимо в структуру ТВС ввести окуляр, через который оператор наблюдает изображение на микромониторе. Тогда необходимо учесть ЧКХ окуляра $K_{око}(\omega)$:

$$K_{око}(\omega) = K_{окд}(\omega)K_{ока}(\omega);$$

$$K_{окд}(\omega) = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_{ок}} \right) - \left(\frac{\omega}{\omega_{ок}} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{ок}} \right)^2} \right];$$

$$K_{ока}(\xi) = 1 - 0,1575 \cdot \left[1 - 4 \left(\frac{\omega}{\omega_{ок}} - 0,5 \right)^2 \right];$$

$$\omega_{ок} = \frac{D_{зрок}}{\lambda},$$

где $K_{окд}(\omega)$ - ЧКХ дифракции окуляра; $K_{ока}(\omega)$ - ЧКХ аберраций окуляра; $\omega_{ок}$ - предельная максимальная пространственная частота окуляра (циклы/мрад); $D_{зрок}$ - диаметр входного зрачка окуляра (мм), λ - длина волны излучения (мкм).

Следует заметить, что при $\omega > \omega_{ок}$ значения $K_{око}(\omega)$, $K_{окд}(\omega)$, $K_{ока}(\omega)$ обращаются в нуль, то есть

$$K_{око}(\omega) = K_{окд}(\omega) = K_{ока}(\omega) = 0, \text{ при } \omega > \omega_{ок}.$$

Иногда в $K(\omega)$ учитывают ЧКХ эффективности переноса заряда $K_{нз}(\omega)$:

$$K_{нз}(\omega) = \left(-N_{нз}(1 - \varepsilon_{нз}) \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi\omega}{\omega_{нз}} \right) \right] \right);$$

$$\omega_{нз} = \frac{N_{нзх}}{\alpha_x},$$

где $N_{нз}$ - общее количество тактов переносов зарядов, $N_{нзх}$ - количество тактов переносов зарядов в горизонтальном направлении (эти характеристики иногда указывают в спецификациях на приемники излучения).

Иногда для учета прохождения излучения через турбулентную атмосферу вводят ЧКХ турбулентности $K_T(\omega)$:

$$K_T(\omega) = \exp \left[-3,44 \left(\frac{1000\lambda\omega}{r_0} \right)^{5/3} \left(1 - \alpha_T \left(\frac{1000\lambda\omega}{D} \right)^{1/3} \right) \right];$$

$$r_0 = 0,185 \left(\alpha_{II} \frac{\lambda^2}{DC_N^2} \right)^{3/5},$$

где $\alpha_{\text{ц}}$ равно 8/3 при сферической волне или 1 – при плоской.

Значение параметра α_T определяется из таблицы 6. Величина экспозиции определяется временем интеграции t_u (время, которое необходимо для накопления и считывания заряда). В том случае если оно более чем 10 мс, считается, что экспозиция «длинная», в противном случае экспозиция – «короткая». Как правило, в современных ТВС время интеграции менее 10 мс.

Таблица 6.

Экспозиция	$D_{зр}$	α_T
«длинная»	$D_{зр} \gg (D\lambda)^{1/2}$	0
«длинная»	$D_{зр} \ll (D\lambda)^{1/2}$	0
«короткая»	$D_{зр} \gg (D\lambda)^{1/2}$	1
«короткая»	$D_{зр} \ll (D\lambda)^{1/2}$	0,5

Иногда для более полного учета прохождения излучения через атмосферу рассматривают ЧКХ аэрозолей $K_{\text{аэп}}(\omega)$ (в данной работе не рассматривается).

В случае, когда в качестве устройства отображения в ТВС применяется микромонитор, и наблюдение оператором осуществляется с помощью окуляра, необходимо учесть ЧКХ глаза оператора $K_G(\omega_G)$:

$$K_G(\omega_G) = K_{\text{Гзр}}(\omega_G) K_{\text{Гсет}}(\omega_G) K_{\text{Гдр}}(\omega_G),$$

где $K_{\text{Гзр}}(\omega_G)$ - ЧКХ зрачка глаза наблюдателя, $K_{\text{Гсет}}(\omega_G)$ - ЧКХ сетчатки глаза наблюдателя, $K_{\text{Гдр}}(\omega_G)$ - ЧКХ дрожания глаза наблюдателя.

ЧКХ зрачка глаза наблюдателя $K_{\text{Гзр}}(\omega_G)$ определяется формулой:

$$K_{\text{Гзр}}(\omega_G) = \exp \left[- \left(\frac{2,504 \omega_G}{f_{\text{Гзр}}} \right)^{N_{\text{Гзр}}} \right];$$

$$f_{\text{Гзр}} = \exp(3,663 - 0,0261 D_{\text{Гзр}}^2 \log D_{\text{Гзр}});$$

$$N_{\text{Гзр}} = \left(0,7155 + \frac{0,277}{\sqrt{D_{\text{Гзр}}}} \right)^2.$$

Диаметр зрачка $D_{\text{Гзр}}$ зависит от яркости микромонитора $L_{\text{ммф}}$ В (фут-ламберт, fL)

$$D_{\text{Гзр}} = -9,011 - 0,5m + 13,25 \exp \left(- \frac{\log L_{\text{ммф}}}{21,082} \right);$$

$$L_{mmf} = \frac{1}{3,426} L_{mm},$$

где $m=0$ если используется монокуляр, $m=1$ если используется бинокляр; L_{mm} - яркость микромонитора ($\kappa\partial/м^2$), $1 \text{ fL} = 3,426 \text{ кд/м}^2$.

ЧКХ сетчатки глаза наблюдателя $K_{Гсет}(\omega_\Gamma)$ определяется формулой:

$$K_{Гсет}(\omega_\Gamma) = \exp(-0,01179\omega_\Gamma^{1,21}).$$

ЧКХ дрожания глаза наблюдателя $K_{Гдр}(\omega_\Gamma)$ определяется в виде

$$K_{Гдр}(\omega_\Gamma) = \exp(-0,001458\omega_\Gamma^2).$$

Таким образом, частотно-контрастная характеристика ТВС $K(\omega)$ при применении в качестве устройства отображения микромонитора принимает вид

$$K(\omega) = K_o(\omega)K_{III}(\omega)K_{oc}(\omega)K_{кв}(\omega)K_\phi(\omega)K_m(\omega)K_{ок}(\omega)K_T(\omega)K_\Gamma(\omega_\Gamma).$$

Следует заметить, что при применении ТВС с монитором следует учитывать влияние монитора на изменение контраста изображения. В соответствии с [3] коэффициент изменения контраста изображения при применении монитора k_m определяется по формуле:

$$k_m = \frac{k_s}{K_{зр}},$$

где k_s - коэффициент, учитывающий свойства экрана монитора.

В соответствии с [3] $k_s = K_{зр}$ если нет увеличения контраста; $k_s = 0,25$ если уровень контраста монитора в ТВС устанавливается автоматически; $k_s = 0,5$ если уровень контраста монитора устанавливается в ручном режиме.

Для большинства систем наблюдения шум системы, необходимого для определения пороговой контрастно-частотной функции ТВС, определяется по формуле [2, 9]

$$\sigma_{sys} = \sigma_{txy} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{txy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{txy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{txy}}\right)^2},$$

где σ_{txy} - среднее квадратическое отклонение случайного шума чувствительной части приемника излучения (пространственно-временной шум); σ_{xy} - среднее квадратическое отклонение пространственного шума, который не изменяется при смене кадра (обусловлен шумом с постоянным спектром и неравномерностью); σ_x - среднее квадратическое отклонение пространственного шума, осредненного по строкам матрицы приемника излучения; σ_y - среднее

квадратическое отклонение пространственного шума, осредненного по столбцам матрицы приемника излучения.

Значения отношений $\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{txy}}$, $\frac{\sigma_x}{\sigma_{txy}}$, $\frac{\sigma_y}{\sigma_{txy}}$ приведены в таблице 7 [2, 9].

Таблица 7.

Отношение СКО шумов	Значения при низком шуме	Значения при умеренном шуме	Значения при сильном шуме
$\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{txy}}$	0,2	0,5	от 1 до 2
$\frac{\sigma_x}{\sigma_{txy}}$	0,2	0,5	от 1 до 2
$\frac{\sigma_y}{\sigma_{txy}}$	0,2	0,5	от 1 до 2

В свою очередь, для ТВС часто принимается приближенное равенство:

$$\sigma_{txy} \approx \Delta_T,$$

где Δ_T - разность температур эквивалентная шуму.

Иногда для точечного источника вместо Δ_T используется характеристика φ_T - плотность потока, эквивалентная шуму [2, 9]. Значения характеристик Δ_T или φ_T , определяют значение такой важной характеристики как отношение сигнал/шум:

$$q = 20 \lg \frac{U_c}{\sigma_{txh}},$$

где: q - отношение сигнал/шум, дБ; U_c - амплитуда сигнала от цели.

Значение q является характеристикой изображения. Экспертная оценка ухудшения качества при увеличении уровня шума по пятибалльной шкале, рекомендованной Международным консультативным комитетом по радиотехнике (МККР), приведена в таблице 8 [10].

Таблица 8

q , дБ	Качество изображения	Ухудшение изображения
50	Отличное	Не заметно
40	Хорошее	Заметно, но не мешает
30	Удовлетворительное	Немного мешает
20	Неудовлетворительное	Мешает
10	Непригодное	Сильно мешает

Обычно значения q приводят в технической документации на приемник излучения для определенных условий, которые могут не соответствовать условиям наблюдения. В

большинстве случаев чувствительность монохромных камер существенно (по сравнению с человеческим глазом) сдвинута в инфракрасный диапазон. У некоторых модификаций чувствительность в ближней инфракрасной области даже выше, чем в видимой. И это часто не учитывается при расчете q [10, 11].

Амплитуду сигнала от цели, измеренную в электронах, в одном пикселе можно вычислить по следующей формуле [12]:

$$U_c = \frac{\pi A_p t_u D_{зр}^2}{4 f'^2 h c} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) l_y(\lambda) \tau_o(\lambda) \lambda d\lambda,$$

где A_p - площадь пикселя; t_u - время интеграции; c - скорость света; h = постоянная Планка; $\eta(\lambda)$ - спектральная квантовая эффективность (квантовый выход); $l_y(\lambda)$ - спектральная плотность энергетической яркости цели.

Спектральная плотность энергетической яркости цели $l_y(\lambda)$ в предположении, что поверхность цели ламбертовская [8], определяется следующим образом [12]:

$$l_y(\lambda) = \tau_c(\lambda) \left[\frac{\rho_y(\lambda) [E_{yc}(\lambda) + E_{yn}(\lambda)]}{\pi} + \varepsilon_y(\lambda, T_y) l_{ид}(\lambda, T_y) \right],$$

где $\tau_c(\lambda)$ - спектральный коэффициент пропускания атмосферы; $\rho_y(\lambda)$ - спектральный коэффициент отражения цели; $E_{yc}(\lambda)$ - спектральная энергетическая освещенность цели солнцем; $E_{yn}(\lambda)$ - спектральная энергетическая освещенность цели небом; $\varepsilon_y(\lambda, T_y)$ - коэффициент теплового излучения цели; $l_{ид}(\lambda, T_y)$ - спектральная плотность энергетической яркости цели как идеального излучателя; T_y - температура цели.

Спектральная плотность энергетической яркости цели как идеального излучателя определяется по формуле

$$l_{ид}(\lambda, T_y) = \frac{M_{ey}(\lambda, T_y)}{\pi},$$

где $M_{ey}(\lambda, T_y)$ - энергетическая светимость цели.

Расчет $\tau_c(\lambda)$, $E_{yc}(\lambda)$ и $E_{yn}(\lambda)$ может быть выполнен, например, с использованием модели MODTRAN [5].

Спектральная квантовая эффективность $\eta(\lambda)$ вычисляется по формуле

$$\eta(\lambda) = \frac{1,24}{\lambda} R_E(\lambda),$$

где

$$R(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_{Rm}} R_m & \text{при } \lambda \leq \lambda_{Rm}, \\ R_m \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\lambda - \lambda_{Rm}}{\lambda_{0,5} - \lambda_{Rm}} \right)^2} & \text{при } \lambda_{Rm} < \lambda \leq \lambda_{Rm} + 1,1547(\lambda_{0,5} - \lambda_{Rm}), \\ 0 & \text{при } \lambda > \lambda_{Rm} + 1,1547(\lambda_{0,5} - \lambda_{Rm}), \end{cases}$$

где $R(\lambda)$ - спектральная чувствительность приемника излучения, R_m - максимальное значение чувствительности приемника излучения; λ_{Rm} - длина волны, при которой приемник излучения имеет максимальное значение чувствительности; $\lambda_{0,5}$ - длина волны, при которой приемник излучения имеет значение чувствительности меньше максимального на 50%, $\lambda_{0,5} > \lambda_{Rm}$.

Шумы чувствительной части приемника излучения имеют несколько независимых причин, вследствие чего среднеквадратичное число шумовых электронов ПЗС определяется геометрической суммой составляющих

Уровень пространственно-временного шума оценивается средним квадратическим отклонением числа шумовых электронов и определяется по формуле [10]:

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2},$$

где σ_i - среднее квадратическое отклонение числа электронов в составляющих шума.

Основными составляющими шума для систем наблюдения являются: фотонный шум, темновой шум, шум считывания, шум квантования (шум дискретизации) [2].

Фотонный шум является следствием дискретной природы света. Любой дискретный процесс подчиняется закону Пуассона, согласно ему, фотонный шум равен квадратному корню из числа фотонов. Таким образом, отношение сигнал/шум в потоке фотонов, падающем на пиксель, будет также равно корню квадратному из числа фотонов. Соответственно, шумовая составляющая зарядового пакета будет также равна корню квадратному из среднего значения числа электронов в потенциальной яме пикселя [11]. Тогда среднее квадратическое отклонение фотонного шума определяется в виде

$$\sigma_\phi = \sqrt{\sigma_{\phi\phi}^2 + \sigma_{\phi\psi}^2},$$

где σ_ϕ - среднее квадратическое отклонение фотонного шума; $\sigma_{\phi\psi}$ - среднее квадратическое отклонение фотонного шума в сигнале от цели; $\sigma_{\phi\phi}$ - среднее квадратическое отклонение фотонного шума в сигнале от фона.

Шум темнового сигнала можно определить, если на вход приемника излучения не подавать световой сигнал (например, плотно закрыть светонепроницаемой крышкой объектив ТВС). Тогда на выходе системы получим так называемые «темновые» кадры. Основной составляющей темнового сигнала является термоэлектронная эмиссия. Чем ниже температура, тем ниже и темновой сигнал. Термоэлектронная эмиссия также подчиняется статистике Пуассона и её шум равен

$$\sigma_{TC} = \sqrt{n_{TC}^2} ;$$

$$n_{TC} = i_{TC} \frac{t_u}{e} = J_{TC} A \frac{t_u}{e},$$

где n_{TC} - число термически сгенерированных электронов в общем сигнале; i_{TC} - темновой ток; J_{TC} - плотность темнового тока; e - заряд электрона; A - площадь приемника излучения.

В спецификации на приемник излучения указывается значение J_{TC} при определенной рабочей температуре $T_{раб}$ приемника излучения. В том случае, если рабочая температура приемника излучения отличается от указанной, то используют следующие эмпирическое правило [8]: значение темнового тока удваивается при увеличении температуры на 8 – 9 °С. Обычно это правило используют в диапазоне температур от $-40^{\circ}\text{C} + T_{раб}$ до $40^{\circ}\text{C} + T_{раб}$.

При отсутствии в спецификации характеристик о шуме темнового сигнала можно воспользоваться следующим правилом [8]:

- для ПЗС коммерческого исполнения при комнатной рабочей температуре значение n_{TC} в одном пикселе за время интеграции 1/30 с равно приблизительно 100 электронам;
- ПЗС с охлаждением может иметь шум, соответствующий пяти электронам в пикселе;
- в ПЗС с охлаждением высокого класса количество электронов n_{TC} в одном пикселе равно одному электрону.

Шумом считывания (собственным шумом) называют дополнительный шум, образующийся при преобразовании сигнала, накопленного в элементе ПЗС, в напряжение, его усилении и выводе из матрицы. Шум считывания можно представить как некоторый базовый уровень шума, который присутствует даже в изображении с нулевым уровнем экспозиции, когда матрица находится в полной темноте, и шум темнового сигнала равен нулю. Типичный шум считывания $\sigma_{сч}$ для хороших образцов ПЗС составляет 15-30 электронов [8, 13]. В ПЗС с охлаждением высокого класса шум считывания равен приблизительно пяти электронам.

Шум квантования (шум дискретизации) возникает при преобразовании аналогового сигнала в дискретный (цифровой). В зависимости от типа аналого-цифрового преобразования шум может возникать из-за округления (до определённого разряда) сигнала или усечения (отбрасывания младших разрядов) сигнала. Среднее квадратическое отклонение шума квантования $\sigma_{кв}$ может быть определено по формуле:

$$\sigma_{кв} = \frac{\sigma_{\phiи}^2 + \sigma_{\phiф}^2}{2^{n_{кв}} \sqrt{12}},$$

где $n_{кв}$ - разрядность аналого-цифрового преобразователя.

С учетом сказанного выше выражение для $\sigma_{лху}$ принимает вид

$$\sigma_{лху} = \sqrt{\sigma_{\phi}^2 + \sigma_{TC}^2 + \sigma_{сч}^2 + \sigma_{кв}^2}.$$

Таким образом, имеются все необходимые данные для решения задачи анализа процесса наблюдения.

Пример

Дано:

1. Характеристики цели

Высота цели $Y_{ц}$, м – 1,7

Ширина цели $X_{ц}$, м – 0,7

Контраст цели $K_{ц}$ – 0,2

Количество целей – 1

Дальность цели D , м – 2500

2. Характеристики атмосферы

Турбулентность C_N^2 , $m^{-2/3}$ – 10^{-13}

Коэффициент, характеризующий отношение яркости трассы наблюдения к яркости фона, χ – 5

Спектральный коэффициент пропускания атмосферы $\bar{\tau}_c^D$ ($D = 2500$ м) – 0,9552

3. Характеристики приемной оптической системы

Фокусное расстояние объектива f' , мм – 300

Относительное отверстие объектива – 1:3,8

Коэффициент пропускания оптики объектива – 0,8

4. Характеристики приемника излучения

Размер матрицы $N_x \times N_y$, пиксель – 1024×768

Размер матрицы, мм – 5,8×4,92

Размер активного элемента пикселя приемника излучения δ_p , мкм – 4.65

Коэффициент заполнения (FillFactor) – 1

Спектральный диапазон, мкм – 0,4 - 0,7

Время интеграции, с – 1/20

5. Характеристики микромонитора

Размер микромонитора $X_{m\delta} \times Y_{m\delta}$, пиксель – 800×600

Размер микромонитора $X_m \times Y_m$, мм – 12,78×9

Яркость микромонитора L_{mm} , кд/м² - 30

Контраст микромонитора, K_{mm} – 0,25

6. Характеристики окуляра

Фокусное расстояние окуляра f' , мм – 20

Тип окуляра – бинокуляр

7. Характеристики шумов

$$\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{txy}} = \frac{\sigma_x}{\sigma_{txy}} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{txy}} = 0,2$$

8. Характеристики сигнала и шумов

Сигнал от цели $\sigma_{\phi\psi}$ - среднее квадратическое отклонение фотонного шума в сигнале от цели) - 10000

Сигнал от фона $\sigma_{\phi\phi}$ - среднее квадратическое отклонение фотонного шума в сигнале от фона) - 100000

Среднее квадратическое отклонение темнового шума $\sigma_{TC} = 100$

Среднее квадратическое отклонение шума считывания $\sigma_{сч}$ - 30

Постановка задачи

Требуется найти вероятность распознавания цели типа ростовая фигура человека (критерий Джонсона $N_{50}=10$) на дальности 2500 м.

Результат решения

На основе применения изложенной методики получен график зависимости вероятности распознавания цели типа ростовая фигура человека от дальности (рисунок 5).

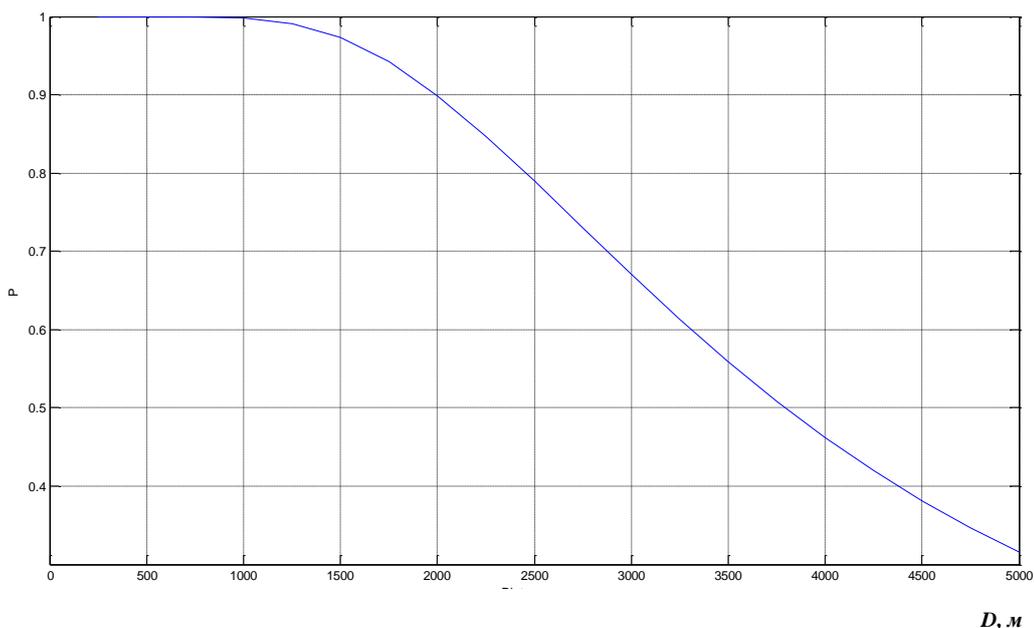


Рисунок 5 - График зависимости вероятности распознавания цели от дальности

Из анализа графика следует, что вероятность распознавания цели типа ростовая фигура человека на дальности 2500 м равна 0,79.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Данные эксперимента по распознаванию цели типа ростовая фигура человека

Выводы

Анализ результатов полевых испытаний ОЭС, проведенных ЗАО "Технологический парк космонавтики "ЛИНКОС" за последние годы, подтверждает эффективность предлагаемой методики хорошим совпадением расчетных и экспериментальных результатов.

Дальнейшее развитие и обсуждение данной методики могло бы послужить основой создания единой стандартной методики оценки обнаружительных характеристик применимой на разных этапах создания ОЭС.

В современных ОЭС широко используются методы цифровой обработки изображений, позволяющие значительно улучшить качество изображения объектов наблюдения и их кодирования (сжатия) для передачи по каналам связи. В качестве примера назовем контрастные преобразования, фильтрацию шума, стабилизацию изображений, наложение изображений разных спектральных диапазонов, супер-разрешение и др. Поэтому одним из важнейших направлений дальнейшего развития предлагаемой методики является оценка влияния методов цифровой обработки изображений на обнаружительные характеристики ОЭС.

Библиографический список

1. А.В. Ковалев, А.А. Ковалев. Возможности методов неразрушающего контроля. Журнал Мир и безопасность №2, 2007.
2. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - fifth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2008.
3. Vollmerhausen, R.H. and E. Jacobs. The Targeting Task Performance (TTP) Metric A New Model for Predicting Target Acquisition Performance. Modeling and Simulation Division Night Vision and Electronic Sensors Directorate U.S. Army CERDEC Fort Belvoir, VA 22060
4. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - second edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2000.
5. A. Berk , G.P. Anderson, P.K. Acharya, M.L. Hoke, J.H. Chetwynd, L.S. Bernstein, E.P. Shettle, M.W. Matthew and S.M. Adler-Golden. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 USER'S MANUAL. 2003
6. Barten P. G. J. Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality (SPIE Press Book). 1999
7. Rachel Hughes. Sensor Model Requirements for TAWS/IRTSS Operation. Naval Postgraduate School. MONTEREY, CALIFORNIA. 2007
8. Ed Friedman, John Lester Miller. Photonics Rules of Thumb: optics, electro-optics, fiber optics, and lasers. Second Edition. McGraw-Hill. 2004
9. Gerald C. Holst. Testing and Evaluation of infrared imaging systems - third edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2008.

10. В.В. Никитин и А.К. Цыцулин. Телевидение в системах физической защиты. С.-Петербург, «СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001.
11. Н. Уваров. Секреты высокой чувствительности телевизионных камер. Журнал «Алгоритм безопасности» № 6, 2002.
12. R. Fiete and T. Tantaló. Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems. Opt. Eng. 40, 574–585 (2001)
13. С.И. Неизвестный, О. Ю. Никулин. Приборы с зарядовой связью - основа современной телевизионной техники. Основные характеристики ПЗС. Журнал "Специальная техника" №4, 5 1999.

Сведения об авторах

Воробьев Алексей Леонидович, генеральный директор ЗАО «Технологический парк космонавтики «ЛИНКОС», 142172, Московская обл., г. Щербинка-2, улица Дорожная, д. 5. Телефон: 8-495-780-68-55

Журик Юрий Павлович, ведущий инженер ЗАО «Технологический парк космонавтики «ЛИНКОС» 142172, Московская обл., г. Щербинка-2, улица Дорожная, д. 5. Телефон: 8-495-780-68-55

Краснов Александр Маркелович, д.т.н., проф., главный конструктор по авиационным системам ЗАО «Технологический парк космонавтики «ЛИНКОС» 142172, Московская обл., г. Щербинка-2, улица Дорожная, д. 5. Телефон: 8-495-780-68-55, a_krasnov@inbox.ru

Шашков Сергей Николаевич, главный метролог- ведущий инженер ЗАО «Технологический парк космонавтики «ЛИНКОС» 142172, Московская обл., г. Щербинка-2, улица Дорожная, д. 5. Телефон: 8-495-780-68-55 sha_serg@mail.ru