

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ БОЕВОЙ ЗАДАЧИ ОПЕРАТОРОМ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ С ОПТИЧЕСКИМ ПРИЦЕЛОМ

Н.В. СЕНАТОРОВ (КП “ЦКБ “Арсенал”, г. Киев),

В.И. МИКИТЕНКО (Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»)

А.В. ГУРНОВИЧ (ЦНИИ вооружения и военной техники Вооружённых сил Украины, г. Киев),

Ю.В. ЛАГНО (ГП “Конструкторское бюро специальной техники”, г. Киев)

Предложен алгоритм оценки эффективности выполнения боевой задачи, учитывающий психофизиологические особенности зрительной системы человека и оптические характеристики прицела. Алгоритм может быть положен в основу математической модели системы «фоно-целевая обстановка – стрелковое оружие – оператор».

Запропоновано алгоритм оцінки ефективності виконання бойової задачі, яка враховує психофізіологічні властивості зорової системи людини і оптичні характеристики прицілу. Алгоритм може бути покладено в основу математичної моделі системи «фоно-цільова обстановка – стрілецька зброя – оператор».

Algorithm for assessment of effectiveness at warlike task execution, which takes into consideration the psycho-physiologic features of man viewing system and optical characteristics of sight, is proposed. Algorithm may be used as base for mathematical «background-target situation – weapon – operator» model.

Постановка задачи. Современные подходы к проектированию оптических средств прицеливания для стрелкового оружия основываются, в основном, на априорной информации о технических характеристиках разработанных ранее образцов (аналогов) и результатах их применения, а также на оптимизации отдельных характеристик на базе обобщенного показателя качества [1, 2, 3]. При таком подходе не в полной мере учитываются физиологические особенности зрительной системы стрелка, и существенно уменьшаются возможности оптимизации характеристик оптического прицела (ОП).

Цель данной статьи – разработка алгоритма оценки эффективности выполнения боевой задачи оператором стрелкового оружия, оснащенного ОП, который учитывал бы психофизиологические особенности зрительной системы человека и оптические характеристики прицела, а также мог бы быть положен в основу математической модели системы «фоно-целевая обстановка – стрелковое оружие с ОП – оператор».

Специфика выполнения боевой задачи с ОП заключается в том, что поиск цели и прицеливание осуществляется вооруженным глазом с увеличением $\Gamma \geq 1$. При этом решение задачи состоит в выполнении последовательных действий – поиска цели, распознавания цели и прицеливания. Для поиска цели характерным признаком является пространственная неопределенность положения искомого объекта, а конечными задачами – обнаружение цели, когда она является единственной (при этом алфавит целей отсутствует, и наблюдатель поставлен перед выбором «цель есть/цели нет»), и последующее её опознание (алфавит целей известен [4], и альтернативы сводятся к принятию решения «что это за цель из алфавита»). Для прицеливания основным признаком может быть пространственная неопределенность взаимного положения оси канала ствола оружия и цели, а конечной задачей – совмещение прицельной марки с расчетной точкой в области цели.

Очевидно, что выполнение боевой задачи носит вероятностный характер. Тогда, в предположении независимости последовательных этапов ее решения, полную вероятность P_{Σ} её выполнения можно определить произведением вероятностей P_i выполнения отдельных операций: обнаружения, распознавания и прицеливания:

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^3 P_i \quad (1)$$

При использовании ОП на стрелковом оружии, дальность стрельбы D которого, как правило, составляет не более 600 м [4], видимые угловые размеры γ цели определяются зависимостью

$$\gamma = 3440 \frac{2h_{y(z)}}{D},$$

где $2h_{y(z)}$ – линейные размеры типовых целей [4], и превышают 3,33 *угл. мин.*

Вероятность P_I обнаружения неподвижной цели зрительной системой оператора зависит от энергетических характеристик цели, окружающего её фона, размера поля поиска и определяется экспоненциальной функцией распределения времени поиска t [5]:

$$P_I(t) = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha(C/[1+q])^2(\gamma\Gamma)^3(\tau B)^{0,3}t}{(2\beta\Gamma)^2}\right),$$

где: α – коэффициент, зависящий от условий ведения поиска; C – контраст объекта с фоном, который имеет яркость B ; τ – пропускание ОП; q – коэффициент светорассеяния ОП; Γ – кратность увеличения ОП; 2β – поле зрения ОП.

При бинокулярном поиске цели принимают $\alpha = 16 \text{град}^2 (\text{кд}/\text{м}^2)^{-0,3} (\text{угл.мин})^{-3} \text{с}^{-1}$, при монокулярном – $\alpha = 12 \text{град}^2 (\text{кд}/\text{м}^2)^{-0,3} (\text{угл.мин})^{-3} \text{с}^{-1}$ [5].

Хорошо известно свойство глаза реагировать на подвижный объект [6]. Поэтому вероятность обнаружения подвижной цели на неподвижном фоне целесообразно учитывать коэффициентом k_ω вида

$$k_\omega = 1 - \exp\left(-\left[\frac{\omega_0}{\omega - \omega_0}\right]^2\right),$$

где ω – угловая скорость цели, а ω_0 – наиболее благоприятное для обнаружения её значение. Тогда при $\omega=0$: $k_\omega=0,63$; при $\omega=\omega_0$: $k_\omega=1$ и при $\omega \rightarrow \infty$: $k_\omega \rightarrow 0$. Существующие экспериментальные исследования [7] свидетельствуют об эффекте сокращения времени поиска цели на движущемся изображении в диапазоне ω от 2 до 6 *град/с*.

Предполагая, что $\omega_0=4 \text{град/с}$, получим окончательное выражение для вероятности обнаружения цели через коллиматорный прицел ($\Gamma=1$)

$$P_I(t) = \left[1 - \exp\left(-\left[\frac{4}{\omega - 4}\right]^2\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha(C/[1+q])^2 \gamma^3 (\tau B)^{0,3} t}{(2\beta)^2}\right)\right]. \quad (2)$$

Для коллиматорного прицела также следует принять 2β равным горизонтальной составляющей зоны ясного видения глаза (30°) [6].

Современные подходы к вопросу опознавания цели базируются на модели наблюдателя. Для боевой задачи, выполняемой стрелком, когда алфавит целей ограничен 7 образами, по мнению авторов, наиболее пригодна модель, которая основана на предположении, что при различении объектов на фоне система «глаз – мозг» работает как оптимальный двумерный фильтр с частотной характеристикой, определяемой равенством [8]:

$$F_{ik}(\omega_y, \omega_z) = \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} [B_i(y, z) - B_k(y, z)] \exp[-j(\omega_y y + \omega_z z)] dy dz \right\}^*, \quad (3)$$

где: * – знак комплексного сопряжения, $B_{i(k)}(y, z)$ – эталонные изображения i, k -го объекта, подвергнутые такому же искажению, которое отличает предъявленное изображение, ω_y, ω_z – пространственные частоты в области изображений.

Известно, что такой фильтр согласован с ожидаемым входным сигналом и в частном случае белого гауссова шума является оптимальным. Согласно теории Н.Н.Красильникова [8] второе слагаемое в выражении (3) описывает пороговое устройство, работающее на основе минимума среднего риска, т.е. $B_k(y, z)$ можно принять равным нулю. С учетом этого выражение (3) принимает вид

$$F_i(\omega_y, \omega_z) = \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} B_i(y, z) \exp[-j(\omega_y y + \omega_z z)] dy dz \right\}^*.$$

Поскольку шум в этом случае является гауссовым, то вероятность распознавания цели P_2 определяется выражением

$$P_2 = 0,5 \left(1 + \Phi \left[\frac{(c/u)_i}{2} \right] \right). \quad (4)$$

Здесь и далее в тексте $\Phi(x_0)$ – интеграл вероятности Гаусса вида

$$\Phi(x_0) = \sqrt{2\pi}^{0,5} \int_0^{x_0} \exp(-0,5x^2) dx,$$

а $(c/u)_i$ – отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра, определяемое формулой

$$(c/u)_i = \frac{\left(\iint_{-\infty}^{\infty} |F_i(\omega_y, \omega_z)|^2 d\omega_y d\omega_z \right)^{1/2}}{\left(\iint_{-\infty}^{\infty} |F_i(\omega_y, \omega_z)|^2 N(\omega_y, \omega_z) d\omega_y d\omega_z \right)^{1/2}},$$

где $N(\omega_y, \omega_z)$ – спектральная плотность мощности шума.

В общей теории распознавания объект рассматривается как точка в многомерном пространстве, осями которого являются признаки сходства с эталонным изображением из алфавита целей. Как показывают исследования [9], наиболее типичными опознавательными признаками являются форма и детали. Минимизация искажений формы и различимость деталей обеспечивается разрешающей способностью ψ'' оптической схемы прицела. Учитывая, что все ОП проектируются с высокой степенью коррекции остаточных aberrаций, которые определяют искажения наблюдаемого объекта в тракте «цель – глаз», разрешающую способность можно определить по формуле

$$\psi'' = \frac{120''}{d},$$

где d (мм) – диаметр входного зрачка телескопического прицела либо диаметр зрачка глаза при использовании коллиматорного прицела.

При оценке качества прицеливания будем исходить из вероятности поражения цели высотой $2h_y$ и шириной $2h_z$ одним выстрелом (рис.).

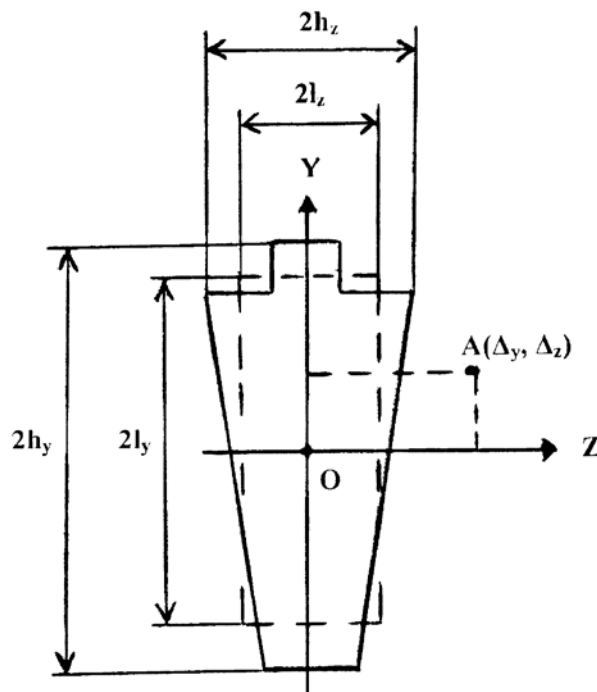


Рис. Схема прицеливания: O – центр цели, $A(\Delta_y, \Delta_z)$ – центр рассеивания боеприпаса

Поскольку цель не является прямоугольником, а имеет фигурное очертание, то для определения вероятности попадания в цель необходимо заменить ее равновеликим прямоугольником, приведенные стороны которого по высоте $2l_y$ и ширине $2l_z$ соответственно равняются

$$l_y = h_y \sqrt{K_\phi}, \quad (5)$$

$$l_z = h_z \sqrt{K_\phi}. \quad (6)$$

где K_ϕ – коэффициент фигурности, который определяется как отношение площади цели к площади описанного вокруг цели прямоугольника.

Основными причинами, которые снижают эффективность стрельбы, являются ошибки подготовки стрельбы (ошибки в определении поправок на метеорологические, баллистические и топографические условия стрельбы и дальности до цели) и ошибки стрельбы (погрешности прицеливания и погрешности изготовления оружия и боеприпасов, которые служат причиной естественного рассеяния пуль). Эти погрешности являются случайными, их невозможно учесть, и потому не возможно ввести раньше времени поправки на их устранение. Однако знание закономерностей погрешности в подготовке и ведении стрельбы позволяет заранее определить расчетным путем ожидаемую эффективность стрельбы или, задавшись необходимой эффективностью выдвинуть требования к характеристикам оружия, боеприпасов и прицела.

Как известно, ошибки подготовки стрельбы приводят к отклонению средней точки попадания от центра цели, тогда как ошибки самой стрельбы приводят к отклонению пуль от средней точки попадания (естественное рассеяние пуль). Поэтому эти группы ошибок учитываются разными путями.

На основе известной ошибки подготовки стрельбы ($E_{y(z)сум}$) определяется математическое ожидание отклонения средней точки попадания от центра цели по высоте (по направлению) $\Delta_{y(z)}$:

$$\Delta_{y(z)} = \frac{2\rho}{\sqrt{\pi}} \int_0^{5E_{y(z)сум}} x e^{-\rho^2 x^2} dx, \quad (7)$$

где ρ – постоянный коэффициент равный 0,477.

Принимается, что при попадании пули в цель обеспечивается ее поражение. Тогда вероятность поражения (попадания в цель) определяется по помощи приведенной функции Лапласа как

$$P_3 = 0.25 \left(\Phi \left(\frac{l_y + M_y}{\sigma_y} \right) + \Phi \left(\frac{l_y - M_y}{\sigma_y} \right) \right) \times \left(\Phi \left(\frac{l_z + M_z}{\sigma_z} \right) + \Phi \left(\frac{l_z - M_z}{\sigma_z} \right) \right). \quad (8)$$

где $\sigma_{y(z)}$ – ошибки стрельбы по высоте (направлению).

Ошибки стрельбы зависят от целого ряда факторов [11], среди которых выделим ошибки, связанные с техническими характеристиками ОП. Среднеквадратическая ошибка σ_1 снятия отсчета с измерительной марки прицела согласно [12] зависит от цены деления марки $2n$: $\sigma_1 = 0,58n$. Среднеквадратическая ошибка σ_2 наводки марки согласно [12] зависит от увеличения ОП: $\sigma_2 = (15'' \dots 50'')/G$. Среднеквадратическая ошибка σ_3 углового положения прицельной марки зависит от параллакса и для ряда схем прицелов определяется алгоритмом, приведенным в работах [13, 14].

Совместное решение уравнений (1), (2), (4) и (8) позволяет рассчитать вероятность выполнения боевой задачи с учетом оптических характеристик прицела и некоторых психофизиологических особенностей зрительной системы оператора.

Выводы. При известных характеристиках ОП предложенная модель может использоваться для оценки вероятности выполнения боевой задачи.

При заданном значении P_{Σ} (согласно [12] для успешного выполнения боевой задачи ($P_{\Sigma} \geq 0,9$)) предложенный алгоритм может использоваться для обоснования тактико-технических требований к ОП перспективного стрелкового оружия, а также для оптимизации его характеристик.

1. *Микитенко В.И., Сенаторов Н.В.* Классификация и методика сопоставительного анализа оптических схем коллиматорных прицелов// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-тех. сб. – Киев: НТЦ АСВ. – 2003.- Вып. 7.- С.11-19.
2. *Гурнович А.В., Сенаторов Н.В., Колобродов В.Г. и др.* Телескопические прицелы для стрелкового оружия// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-тех. журнал. - Киев: НТЦ АСВ. – 2004.- № 3(12).- С. 18 - 22.
3. *Сенаторов Н.В., Микитенко В.И.* Оптимизация конструкции моноблочного коллиматорного прицела// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-тех. журнал. - Киев: НТЦ АСВ. – 2003.- № 1(8).- С.27-29.
4. *Травникова Н.П.* Эффективность визуального поиска. -М.: Машиностроение, 1985. – 126 с.
5. *Петрова Л.Ф.* Модели зрительного поиска. Труды ГОИ им. С.И.Вавилова, том 57, вып. 191.- Л-д: 1984. - С. 37-55.
6. *Луизов А.В.* Глаз и свет. - Л-д: «Энергоатомиздат», 1983. - 140 с.
7. *Веселова Е.К.* Экспериментальное исследование зрительного поиска объекта на движущемся изображении. Труды ГОИ им. С.И.Вавилова, том 57, вып. 191.- Л-д: 1984. - С. 158-165.
8. *Красильников Н.Н.* Статистическая теория передачи изображения. – М.: «Связь», 1976. - 184 с.
9. *Вифанский Ю.К., Мироненко И.А.* Об опознавательных признаках объектов. Труды ГОИ им. С.И.Вавилова, том 57, вып. 191.- Л-д: 1984. - С. 153-158.
10. *Сенаторов Н.В., Микитенко В.И., Лагно Ю.В. и др.* Полунатурная модель цели для определения исходных данных стрельбы из стрелкового оружия// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-тех. журнал. - Киев: НТЦ АСВ. –2004.- № 2(11).- С.35-37.
11. *Мубаракшин Р.В., Балувев В.М., Воронов Б.В.* Прицельные системы стрельбы. - М.: Издание ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 1973.- 332 с.
12. *Ананьев И.Н.* Основы устройства прицелов. - М.: Военное издательство министерства вооруженных сил Союза ССР, 1947.- 440 с.
13. *Сенаторов Н.В., Микитенко В.И.* Модели параллактической ошибки коллиматорного прицела на базе сферического зеркала со смещенной геометрической осью// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-тех. журнал. - Киев: НТЦ АСВ. –2003.- № 2(9).- С.20-23.
14. *Сенаторов Н.В., Микитенко В.И.* Модели параллактической ошибки линзового моноблочного коллиматорного прицела// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-тех. журнал. - Киев: НТЦ АСВ. –2004.- № 1(10).- С.34-36.