УДК 623.4.01

М. А. Смирнов

Методика оценки эффективности информационных средств ЗРК (ЗРС) при обнаружении ГЗКР с учетом динамической ЭПР цели

Предложена методика, позволяющая оценить эффективность информационных средств зенитного ракетного комплекса (зенитной ракетной системы) при обнаружении гиперзвуковой крылатой ракеты с учетом динамической эффективной площади рассеяния цели. Оценка эффективности осуществляется путем проведения статистических испытаний на имитационной модели и построения вертикального сечения зоны обнаружения. При этом расчет эффективной площади рассеяния гиперзвуковой крылатой ракеты проводится в зависимости от параметров движения цели вокруг центра масс относительно наземной радиолокационной станции обнаружения и ее линии визирования.

Ключевые слова: эффективность, зенитный ракетный комплекс, информационные средства, гиперзвуковая крылатая ракета, динамическая эффективная площадь, рассеяние цели.

Одним из перспективных направлений в рамках концепции «Мгновенный глобальный удар» в США является создание гиперзвуковых крылатых ракет (ГЗКР). Высокая скорость ГЗКР $V = 6...8$ М и возможность осуществления полета в диапазоне высот $H = 30...70$ км могут существенно затруднить обнаружение их существующими информационными средствами зенитного ракетного комплекса (ЗРК) (зенитной ракетной системы (ЗРС)).

При этом принятие решений на выбор оптимальных тактико-технических характеристик перспективных информационных средств включает этап оценки эффективности при сравнении их альтернативных вариантов.

В настоящее время создана обширная научно-методическая база [1, 2] для проведения подобных исследований, согласно которой оценка эффективности как отдельных образцов вооружения, так и группировок зенитных ракетных войск (ЗРВ) проводится с использованием комплекса аналитических и имитационных моделей, позволяющих оценить эффективность ЗРК (ЗРС) для различных вариантов налета средств воздушного нападения (СВН) и состава группировки ЗРВ по различным интегральным и частным показателям эффективности. При этом показателем эффективности информационных средств являются реализуемые зоны обнаружения аэродинамических и баллистических целей радиоэлектронными средствами ЗРК (ЗРС) [1].

© Смирнов М. А., 2019

В то же время проведение эксперимента в реальных условиях для оценки зоны обнаружения требует значительных временных, материальных и трудовых затрат, кроме того, необходимо наличие летательного аппарата, имитирующего полет ГЗКР. А применение известных аналитических методик возможно только с допущением о том, что цель является материальной точкой со средним или медианным значением эффективной площади рассеяния (ЭПР) в широком диапазоне ожидаемых ракурсов облучения цели.

Однако при полете ГЗКР в реальных условиях ее центр масс с высокой скоростью перемещается относительно РЛС обнаружения и изменяется ее ориентация относительно линии визирования РЛС. В результате рассеивающие свойства цели непрерывно меняются. Для описания динамики изменения рассеивающей способности цели используется понятие динамической эффективной площади рассеяния, которая представляет собой зависимость ЭПР цели от времени.

В связи с вышеизложенным разработана методика оценки эффективности информационных средств ЗРК (ЗРС) при обнаружении ГЗКР с учетом динамической ЭПР цели, структурная схема которой представлена на рис. 1.

1. На первом этапе методики осуществляется задание исходных данных для моделирования:

• начальное положение центра масс ГЗКР в геоцентрической системе координат (r, λ, φ), ее ориентация в пространстве, технические

характеристики и диаграмма обратного отражения цели $\sigma(\varphi_n, \lambda_n, \gamma_n)$;

• координаты объекта удара в геоцентрической системе координат $(r_ц, \lambda_ц, \varphi_ц)$;

• координаты наземной РЛС обнаружения в геоцентрической системе координат $(r_0, \varphi_0, \lambda_0)$ и ее технические характеристики.

2. Положение центра масс ГЗКР задается радиусом r и углами λ и φ (геоцентрические долгота и широта), определяющими взаимную ориентацию осей геоцентрической гринвичской прямоугольной и местной географической систем координат.

Кинематические и динамические уравнения движения имеют вид [3]:

$$\frac{dr}{dt} = V\sin\theta; \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{V}{r}\cos\psi\cos\theta; \quad (2)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{V}{r}\frac{\cos\psi\cos\theta}{\cos\varphi}; \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{X}{m} - g_r\sin\theta - g_\omega(\cos\varphi\cos\psi\cos\theta + \sin\varphi\sin\theta); \quad (4)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{Z}{mV\cos\theta} + \frac{g_\omega\cos\varphi\sin\psi}{V\cos\theta} + \frac{V}{r}\operatorname{tg}\varphi\sin\psi\cos\theta + 2\omega_з(\cos\varphi\cos\psi\operatorname{tg}\theta - \sin\varphi); \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{Y}{mV} - \frac{g_r}{V}\cos\theta - \frac{g_\omega}{V}(-\cos\varphi\cos\psi\sin\theta + \sin\varphi\cos\theta) + \frac{V}{r}\cos\theta - 2\omega_з\cos\varphi\sin\psi, \quad (6)$$

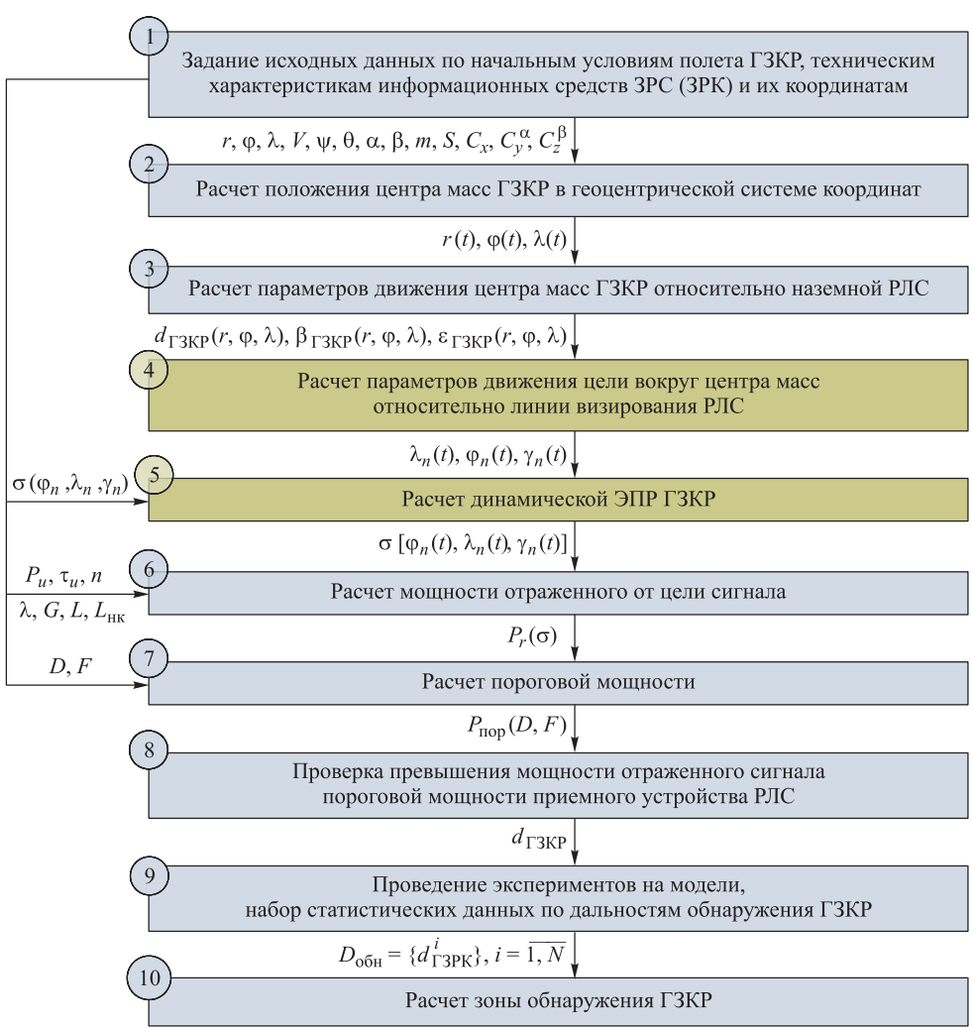


Рис. 1. Структурная схема предлагаемой методики

где g_r и g_ω – проекции ускорения силы притяжения Земли на радиус-вектор $\bar{r}$ и вектор $\bar{\omega}_з$;

$\omega_з$ – угловая скорость вращения Земли;

X, Y, Z – составляющие полной аэродинамической силы в проекциях на оси полускоростной системы координат:

$$X = -C_x S \frac{\rho V^2}{2};$$

$$Y = C_y^\alpha \alpha S \frac{\rho V^2}{2};$$

$$Z = C_z^\beta \beta S \frac{\rho V^2}{2}.$$

Здесь $C_x, C_y^\alpha, C_z^\beta$ – аэродинамические коэффициенты;

S – площадь миделевого сечения;

α – угол атаки;

β – угол скольжения.

Численное интегрирование с заданным постоянным шагом по времени уравнений (1)–(6) известными методами позволяет рассчитать параметры движения центра масс ГЗКР в геоцентрической системе координат.

3. Для расчета параметров движения центра масс ГЗКР относительно наземной РЛС на каждом шаге моделирования осуществляется пересчет координат r, λ, φ в гринвичскую прямоугольную систему координат:

$$X_{\text{ГЗКР}} = r\cos\varphi\cos\lambda; \quad (7)$$

$$Y_{\text{ГЗКР}} = r\cos\varphi\sin\lambda; \quad (8)$$

$$Z_{\text{ГЗКР}} = r\sin\varphi. \quad (9)$$

Затем рассчитываются координаты центра масс цели в топоцентрической (измерительной) системе координат РЛС, сначала в прямоугольной по формулам (10)–(12), потом в сферической по формулам (13)–(15):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{N} \begin{pmatrix} X_{\text{ГЗКР}} - X_{\text{РЛС}} \\ Y_{\text{ГЗКР}} - Y_{\text{РЛС}} \\ Z_{\text{ГЗКР}} - Z_{\text{РЛС}} \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin L_0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$B_0 = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg}\varphi_0}{[1-(2\tilde{a}-\tilde{a}^2)]}; \quad (12)$$

$$d_{\text{ГЗКР}} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad (13)$$

$$\beta_{\text{ГЗКР}} = \operatorname{arctg} \frac{z}{x}; \quad (14)$$

$$\varepsilon_{\text{ГЗКР}} = \operatorname{arctg} \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}, \quad (15)$$

где **N** – матрица перехода от геоцентрической гринвичской прямоугольной системы координат к топоцентрической системе;

$X_{\text{РЛС}}, Y_{\text{РЛС}}, Z_{\text{РЛС}}$ – координаты точки стояния РЛС в геоцентрической гринвичской прямоугольной системе координат (рассчитываются аналогично формулам (7)–(9) в соответствии с заданными в исходных данных $r_0, \varphi_0, \lambda_0$);

B_0 – геодезическая широта точки стояния РЛС;

L_0 – геодезическая долгота точки стояния РЛС, $L_0 = \lambda_0$;

$\tilde{a}$ – коэффициент сжатия Земли;

$d_{\text{ГЗКР}}$ – наклонная дальность до цели (центр масс ГЗКР);

$\beta_{\text{ГЗКР}}$ – азимут цели;

$\varepsilon_{\text{ГЗКР}}$ – угол места цели.

4. Рассчитывают параметры движения цели вокруг центра масс относительно РЛС и ее линии визирования – углов нутации $\varphi_n(t)$, прецессии $\lambda_n(t)$ и собственного вращения $\gamma_n(t)$.

Для этого необходимо вычислить матрицу направляющих косинусов между связанной и визирной системами координат:

$$\mathbf{M} = \mathbf{C}^T \mathbf{N} \mathbf{P}^T \mathbf{L}^T \mathbf{S}^T,$$

где **C** – матрица перехода от топоцентрической системы координат к визирной;

N – матрица перехода от геоцентрической гринвичской прямоугольной системы координат к топоцентрической системе;

P – матрица перехода от местной географической системы к геоцентрической гринвичской прямоугольной системе координат;

L – матрица перехода от местной географической системы координат к полускоростной;

S – матрица перехода от полускоростной системы координат к связанной.

Углы φ_n, λ_n и γ_n рассчитываются из матрицы **M** [4]:

$$\varphi_n = \arccos(m_{11}), \qquad \varphi_n \in [0, 2\pi],$$

$$\lambda_n = \arcsin\frac{m_{21}}{\sqrt{1-m_{11}^2}}, \quad \lambda_n \in [0, 2\pi],$$

$$\gamma_n = \arcsin\frac{m_{12}}{\sqrt{1-m_{11}^2}}, \quad \gamma_n \in [0, 2\pi],$$

где m_{11}, m_{12}, m_{21} – соответствующие элементы матрицы **M**.

5. В соответствии с заданной в исходных данных диаграммой обратного отражения ГЗКР $\sigma(\varphi_n, \lambda_n, \gamma_n)$ рассчитывают текущее значение ЭПР в зависимости от ориентации цели относительно линии визирования РЛС $\sigma[\varphi_n(t), \lambda_n(t), \gamma_n(t)]$ (динамическая ЭПР).

6. Вычисляют мощность отраженного от цели сигнала на входе приемного устройства РЛС:

$$P_r[\sigma(t)] = \frac{P_t G(\varepsilon,\beta)^2 \lambda^2 \sigma(\varphi_n(t), \lambda_n(t), \gamma_n(t)) F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 d_{\text{ГЗКР}}^4},$$

где P_t – мощность сигнала, излучаемого передающей антенной;

$G(\varepsilon,\beta)$ – коэффициент усиления антенны;

λ – длина волны РЛС;

F_t – множитель влияния Земли и тропосферы на трассе передающая антенна – цель (интерференционный множитель);

F_r – аналогичный множитель на трассе цель – приемная антенна [5].

7. Затем рассчитывают минимальную мощность сигнала на входе приемника, при которой он обнаруживается с заданными вероятностями правильного обнаружения D и ложной тревоги F (пороговая мощность) [6]:

$$P_{\text{пор}} = q_{\text{пор}} \frac{k_{\text{ш}} kTLL_{\text{нк}}}{n\tau_{\text{и}}};$$

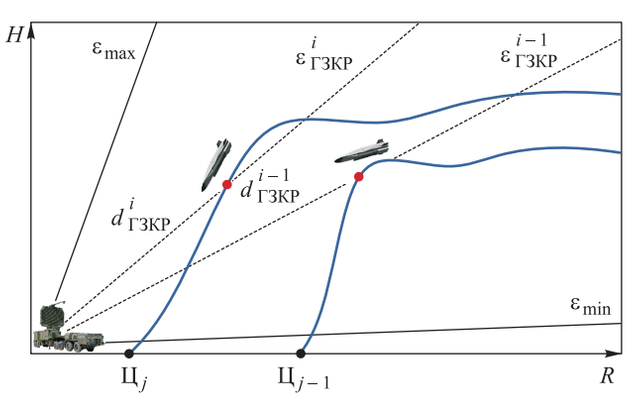


Рис. 2. Расчет дальностей обнаружения ГЗКР при различных значениях угла места цели

$$q_{\text{пор}} = \frac{1}{n}\left(\frac{\ln F}{\ln D} - 1\right),$$

где $k_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приемника;

k – постоянная Больцмана;

T – температура;

L – коэффициент потерь в связи с неоптимальностью приема;

$L_{\text{нк}}$ – потери на некогерентное накопление;

n – количество импульсов.

8. На следующем шаге проверяют условие превышения мощности отраженного от цели сигнала пороговой мощности на входе приемного устройства РЛС:

$$P_r[\sigma(t)] \geq P_{\text{пор}}. \qquad (16)$$

При выполнении условия (16) ГЗКР считается обнаруженной на дальности $d_{\text{ГЗКР}}$ при угле места $\varepsilon_{\text{ГЗКР}}$ с заданными показателями качества обнаружения D и F.

9. Используя метод статистического моделирования [7], проводят необходимое количество испытаний N на модели (этапы 1–8 методики) для получения статистических данных по дальностям обнаружения ГЗКР $D_{\text{обн}} = \{d_{\text{ГЗКР}}^i\}$, $i = \overline{1, N}$ при различных значениях угла места цели (рис. 2). При этом координаты цели $\text{Ц}_j = (r_{\text{ц}}^j, \lambda_{\text{ц}}^j, \varphi_{\text{ц}}^j)$ и начальные условия моделирования (положение центра масс ГЗКР, ориентация относительно вектора скорости, скорость и ориентация вектора скорости цели) должны изменяться случайным образом в заданном диапазоне.

10. На основе полученных статистических данных вычисляют зону обнаружения ГЗКР.

Для этого рассчитывают оценки математического ожидания и дисперсии дальности обнаружения ГЗКР для требуемых направлений по углу места ($\varepsilon_{\text{ГЗКР}}^k$, $k = \overline{\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}}$) с заданным постоянным шагом $\Delta\varepsilon$:

$$\tilde{m}_d^k = \frac{\sum_{i=1}^{N} d_{\text{ГЗКР}}^i}{N};$$

$$\tilde{D}_k = \frac{\sum_{i=1}^{N} (d_{\text{ГЗКР}}^i - \tilde{m}_d^k)^2}{n-1},$$

где $d^i_{\text{ГЗКР}}$ – дальность обнаружения ГЗКР, полученная при i-м испытании, соответствующая углу места $\varepsilon^k_{\text{ГЗКР}}$;

N – общее число испытаний на модели.

Затем рассчитывают горизонтальную дальность и высоту обнаружения ГЗКР, соответствующие k-му значению угла места цели с учетом сферической Земли:

$$\tilde{R}_k = \tilde{m}^k_d \cos(\varepsilon^k_{\text{ГЗКР}});$$

$$\tilde{H}_k = \tilde{R}_k \sin\varepsilon^k_{\text{ГЗКР}} + \frac{\tilde{R}_k^{\,2}}{2R_э},$$

где $R_э$ – эффективный радиус Земли.

Далее вычисляют вертикальное сечение зоны обнаружения ГЗКР путем нанесения на координатную сетку полученных значений $\tilde{R}_k$, $\tilde{H}_k$ по каждому угломестному направлению $\varepsilon^k_{\text{ГЗКР}}$ и выполняют построение замкнутой кривой, ограничивающей зону обнаружения (рис. 3).

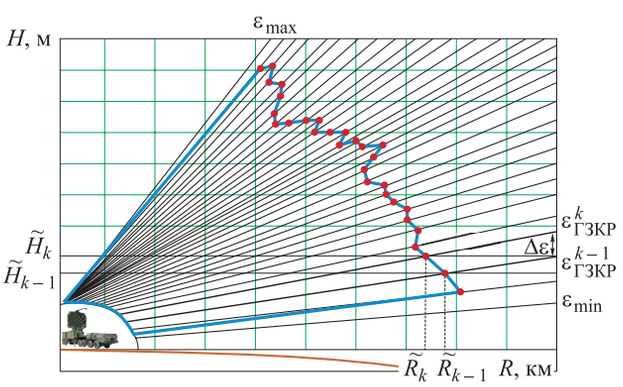


Рис. 3. Вертикальное сечение зоны обнаружения

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить эффективность информационных средств ЗРК (ЗРС) при обнаружении ГЗКР с учетом динамической ЭПР цели и может быть использована при формировании характеристик и сравнении альтернативных вариантов перспективных информационных средств с целью повышения эффективности ЗРК (ЗРС) в условиях применения противником ГЗКР. Направлением дальнейших исследований являются программная реализация имитационной модели и получение оценок согласно методике.

Список литературы

1. Военная кибернетика: методология обоснования направлений развития зенитного ракетного вооружения и синтеза зенитных ракетных систем / под ред. *А. С. Сумина*, *Ю. И. Арепина*. М.: ВИМИ, 1997. 399 с.

2. Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика / под ред. *П. А. Созинова*, *И. Н. Глушкова*. Тверь, 2013. 528 с.

3. *Разоренов Г. Н.*, *Бахрамов Э. А.*, *Титов Ю. Ф.* Системы управления летательными аппаратами (баллистическими ракетами и их головными частями): учебник для вузов / под ред. *Г. Н. Разоренова*. М.: Машиностроение, 2003. 584 с.

4. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / *М. Е. Варганов*, *Ю. С. Зиновьев*, *Л. Ю. Астанин* и др.; под ред. *Л. Т. Тучкова*. М.: Радио и связь, 1985. 236 с.

5. Справочник по радиолокации. В 4 т. Т. 1. Основы радиолокации / под ред. *К. Н. Трофимова*, *Я. С. Ицхоки*. М.: Советское радио, 1976. 456 с.

6. *Бакулев П. А.* Радиолокационные системы: учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2015. 440 с.

7. *Сирота А. А.* Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. М.: Техносфера, 2006. 280 с.

Поступила 29.11.18

Смирнов Михаил Антонович – адъюнкт Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия воздушно-космической обороны имени маршала Советского Союза Г. К. Жукова» Министерства обороны Российской Федерации, г. Тверь.

Область научных интересов: оценка эффективности боевых действий, имитационное моделирование.

Methodology for evaluating effectiveness of air defense missile system (ADMS) information resources when detecting a hypersonic cruise missile, with account for the dynamic target scattering crossover

The study introduces a method that evaluates the effectiveness of information resources of an air defense missile system when detecting a hypersonic cruise missile. The method takes into account the dynamic target scattering crossover. The efficiency is evaluated by conducting statistical tests on a simulation model and constructing a vertical section of the detection zone. In this case, the effective target scattering crossover of a hypersonic cruise missile is calculated depending on the parameters of its movement around the center of mass relative to the ground-based detection radar and its line of sight.

Keywords: efficiency, air defense missile system, information resources, hypersonic cruise missile, dynamic target scattering crossover, target scattering.

Smirnov Mikhail Antonovich – service student, Federal State Military Educational Institution of Higher Professional Education “Military Aerospace Defense Academy named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov (Tver)” of the Russian Federation Department of Defense, Tver.

Science research interests: evaluation of tactical effectiveness, simulation modeling.