

Н.Н. Петрушенко<sup>1</sup>, В.Д. Карлов<sup>2</sup>, И.Г. Леонов<sup>2</sup>, Д.В. Карлов<sup>2</sup>, И.А. Нос<sup>2</sup><sup>1</sup>Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ОСОБЕННОСТИ ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ТОЧНОСТИ ЦЕЛЕУКАЗАНИЯ ЗЕНИТНОМУ РАКЕТНОМУ КОМПЛЕКСУ ПРИКРЫТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваются особенности предъявления требований точности целеуказания зенитному ракетному комплексу прикрытия экологически опасного объекта. Основное внимание уделено рассмотрению методики расчёта допустимых ошибок измерения разностей угловых координат цели и ракеты в зенитном ракетном комплексе с телеуправлением, использующем трехточечный метод наведения. Получено соотношение, позволяющее оценить необходимую точность измерения разности угловых координат цели и ракеты для обеспечения заданной вероятности поражения цели одной ракетой при фиксированной дальности от цели до ракеты.

**Ключевые слова:** зенитный ракетный комплекс, целеуказание, одиночная цель, вероятность поражения одиночной цели.

### Введение

**Постановка проблемы.** В настоящее время возрастают требования [1] к времени реакции зенитных ракетных комплексов (ЗРК) на возникающие угрозы. Это особенно характерно [2] для комплексов непосредственного прикрытия экологически опасных объектов, расположенных на берегу моря или водохранилищ. Общепринято [3], что единственно возможный способ уменьшения времени реакции у существующих ЗРК должен базироваться на повышении точности целеуказания. Однако, в известной литературе отсутствуют сведения о возможных подходах предъявления требований точности целеуказания ЗРК в зависимости от времени его реакции. В настоящей работе делается попытка восполнить этот пробел.

**Целью статьи** является разработка методики предъявления требований точности целеуказания ЗРК непосредственного прикрытия экологически опасных объектов.

### Основная часть

Как известно [4] в основе всех показателей боевой эффективности зенитных ракетных комплексов лежит вероятность  $P_1$  поражения одиночной цели одной ракетой. В наиболее общем случае для систем с командным телеуправлением при расчёте вероятности  $P_1$  полагают [4], что рассеивание ракет в "картинной" плоскости (плоскости перпендикулярной вектору  $\vec{V}_{отн}$  относительной скорости сближения  $\vec{V}_p$  ракеты с  $\vec{V}_ц$  целью:  $\vec{V}_{отн} = \vec{V}_p - \vec{V}_ц$ ) подчиняются закону распределения Райса, плотность вероятности которого имеет вид [4, 5]:

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + m^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{r \cdot m}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $r$  – величина промаха (кратчайшего расстояния между целью и траекторией ракеты) в "картинной" плоскости (рис. 1);  $\sigma$  – среднеквадратическое значение ошибки наведения ракеты;  $m$  – математическое ожидание ошибки наведения;  $I_0$  – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

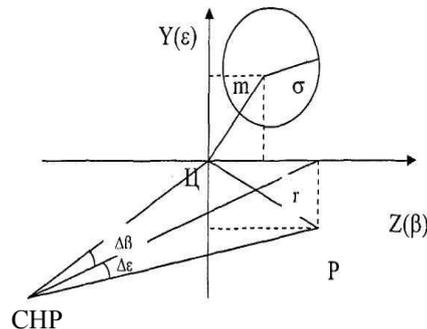


Рис. 1. Составляющие ошибок наведения телеуправляемых ракет

Величина  $\sigma$  в соотношении (1) характеризует случайную составляющую, а  $m$  – систематическую составляющую ошибки наведения ракеты на цель. Физически параметр  $m$  характеризует степень совмещения фокальной оси антенны с направлением на цель. Именно эту информацию система наведения ракеты получает от системы целеуказания. Уменьшение  $m$  ведет к уменьшению времени реакции ЗРК, т.е. к увеличению вероятности поражения цели на заданном рубеже за заданный промежуток времени. Поэтому, получение зависимостей вероятности поражения цели как функции математического ожидания точности целеуказания с учетом характеристик наведения можно считать базой настоящего исследования.

Функция распределения ошибок наведения  $F(r \leq R)$  представляет собой [4] вероятность попа-

дания ракеты в круг радиуса  $R$  с центром, совмещенным с условным центром обстреливаемой цели

$$F(r \leq R) = \int_0^R f(r) dr. \quad (2)$$

Вероятность  $P_1$  поражения одиночной цели одной ракетой отображает степень осуществления двух последовательных событий. Первое событие заключается в выводе ракеты к цели, а второе - в поражении цели в результате подрыва боевой части ракеты в точке вывода. Таким образом вероятность  $P_1$  определяют [4] как:

$$P_1 = \int_0^R G(r) f(r) dr, \quad (3)$$

где  $G(r)$  – условная вероятность поражения цели.

На практике [3, 4] полагают, что

$$G(r) = \exp -r^2 / 2R_0^2, \quad (4)$$

где  $R_0$  – параметр закона поражения (рис. 2).

В литературе [4] параметр  $R_0$  получил название эффективного радиуса поражения цели, представляющего собой обобщенную характеристику уязвимости цели, мощности боевой части, эффективности неконтактного взрывателя и условий стрельбы.

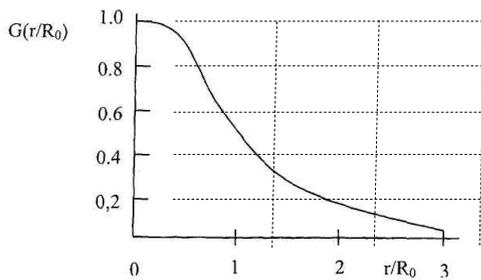


Рис. 2. Распределение условной вероятности поражения цели

Учитывая (1), (3), (4) несложно видеть, что общее выражение для вероятности поражения одиночной цели одной ракетой имеет вид:

$$P_1 = \int_0^{\infty} \frac{r}{\sigma^2} I_0 \left( \frac{r \cdot m}{\sigma^2} \right) \exp \left( - \left[ \frac{r^2 + m^2}{\sigma^2} + \frac{r^2}{2R_0^2} \right] \right) dr. \quad (5)$$

Если в (5) произвести замену переменных и свести подынтегральное выражение к виду некоторой плотности распределения вероятности  $\varphi(r)$ ,

удовлетворяющей уравнению:  $\int_0^{\infty} \varphi(r) dr = 1$ , то, как

показано в [4], получим:

$$P_1 = \frac{R_0^2}{\sigma^2 + R_0^2} \exp -m^2 / 2 \sigma^2 + R_0^2. \quad (6)$$

В известной литературе [3, 4] вводят понятие приведенного значения линейной среднеквадратической ошибки наведения  $\alpha = \sigma/R_0$  и приведенного

значения средней линейной ошибки наведения  $\gamma = m/R_0$ , а соотношения (6) преобразуют к виду:

$$P_1 \alpha, \gamma = \frac{1}{1 + \alpha^2} \exp -\gamma^2 / 2 (1 + \alpha^2). \quad (7)$$

Используя соотношение (7) в [4] были построены графики зависимости  $P_1(\alpha, \gamma)$ . Для примера на рис. 3 приведены графики зависимости вероятности поражения одиночной цели одной ракетой  $P_1(\alpha, \gamma)$  применительно к случаю, когда приведенное значение средней ошибки наведения  $\gamma$  принимает значения 0, 1, 2.

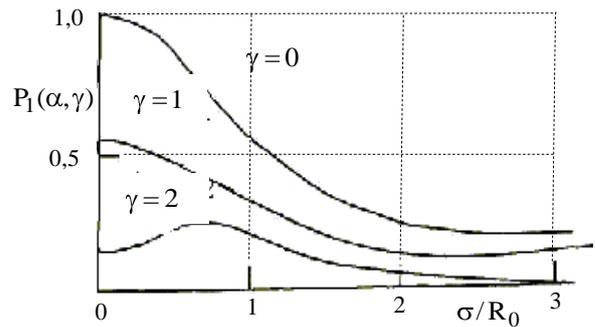


Рис. 3. График зависимости  $P_1(\alpha, \gamma)$

Аналитическое соотношение для зависимости погрешностей измерения ошибок наведения и вероятности поражения одиночной цели одной ракетой находят [4], используя разложение соотношения (7) в ряд Тейлора для функций нескольких переменных. В результате выполнения этой операции получим:

$$P_1(\alpha, \gamma) = C_\alpha \cdot \alpha + C_\gamma \cdot \gamma,$$

где  $C_\alpha = \left| \alpha \left[ \gamma^2 - 2 (1 + \alpha^2) \right] / (1 + \alpha^2)^2 \right|$ ,  $C_\gamma = \left| \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} \right|$ .

Для систем с равноточным измерением координат (при  $\alpha = \gamma = v$ ) считают [4], что

$$C_v = v (3 + 2v^2) / (1 + \alpha^2)^2.$$

График зависимости  $C_\alpha(\alpha)$ ,  $C_\gamma(\gamma)$ ,  $C_v(v)$  приведен на рис. 4. Для систем с равноточным измерением координат соотношение (7) в свою очередь преобразуется к виду:

$$P v = \frac{1}{1 + v^2} \exp -v^2 / 2 (1 + v^2). \quad (8)$$

Если прологарифмировать левую и правую часть соотношения (8) и учесть, что на практике ( $v^2 \ll 1$ ) [4], то получим  $v^2 = 2/3 \cdot |\ln P_1|$ . Учитывая, что линейные ошибки связаны с угловыми соотношениями  $\sigma_{\Delta\varphi} = \sigma/D$ ;  $m_{\Delta\varphi} = m/D$ , где  $D$  – расстояние до цели, получим

$$\alpha = \frac{\sigma_{\Delta\varphi} D}{R_0}; \quad \gamma = \frac{m_{\Delta\varphi} D}{R_0}.$$

Поскольку в радиолокационной практике измеряемыми координатами являются угол места  $\varepsilon$  и азимут  $\beta$ , то

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{1}{2} \sigma_{\Delta\varepsilon} + \sigma_{\Delta\beta} ; m_{\Delta\varphi} = \sqrt{m_{\Delta\varepsilon}^2 + m_{\Delta\beta}^2} .$$

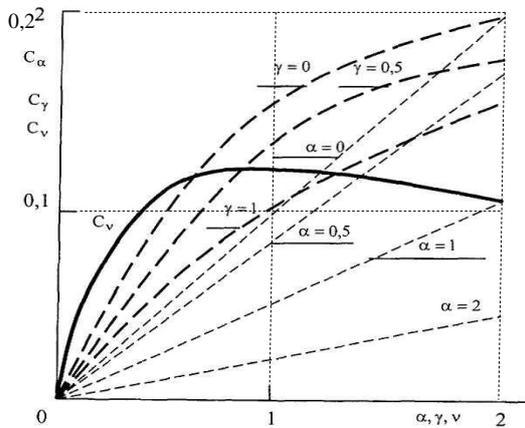


Рис. 4. Графики зависимости:  $C_{\alpha(\alpha,\gamma)}$  – жирный пунктир;  $C_{\gamma(\gamma,\alpha)}$  – тонкий пунктир;  $C_{v(v)}$  – сплошная линия

Используя полученные соотношения, можно вывести удобную формулу для оценки требуемой точности измерения разности угловых координат цели и ракеты в виде:

$$\Delta\varphi = \frac{R_0}{D} |\ln P_1| , \quad (9)$$

где  $D$  – расстояние от цели до ракеты.

График зависимости  $\Delta\varphi^0(R_0/D)$  приведен на рис. 5. Из (9) следует, что допустимые ошибки измерения разностей угловых координат целей и ракет в ЗРК с телеуправлением, использующем трехточечные методы наведения, не должны в районе точки встречи превышать нескольких угловых минут в дальней зоне (40 – 50 м) и нескольких десятых долей градуса в ближней зоне (1 – 10 м).

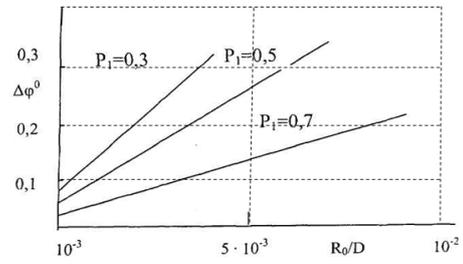


Рис. 5. Зависимость  $\Delta\varphi^0(R_0/D)$

### Выводы

Таким образом, методика предъявления требований точности целеуказания ЗРК в условиях ограниченного времени наведения сводится к заданию требований вероятности поражения одиночной цели одной ракетой и определения на ее основе требований к невязке истинного направления на цель и данных целеуказания.

### Список литературы

1. Основи теорії обґрунтування вимог до параметрів стійкості руху керованих ракет класу «поверхня – повітря» на гіперзвукових швидкостях / О.В. Боровик, В.В. Зубарев, А.П. Ковтуненко, О.П. Коростельов. – К.: НАУ, 2007. – 320 с.
2. Ковтуненко А.П. Основы анализа сложных технических систем. Теория и приложения / А.П. Ковтуненко, В.В. Зубарев. – К., 2009. – 496 с.
3. Бурцев В.В. Систематичні основи побудови та бойового використання комплексів і систем зенітного озброєння / В.В. Бурцев. – Х.: ХУ ПС, 2005. – 286 с.
4. Ковтуненко А.П. Основы теории построения и моделирования функционирования сложных систем вооружения: учебник / А.П. Ковтуненко, Н.А. Шершнев. – Х. ВИРТА, 1992. – 234 с.
5. Більчук В.М. Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика: підручник / В.М. Більчук. – Х.: ХУ ПС, 2009. – 436 с.

Поступила в редколлегию 20.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ОСОБЛИВОСТІ ВИСУВАННЯ ВИМОГ ТОЧНОСТІ ЦЕЛЕВКАЗУВАННЯ ЗЕНІТНОМУ РАКЕТНОМУ КОМПЛЕКСУ ПРИКРИТТЯ ЕКОЛОГІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

М.М. Петрушенко, В.Д. Карлов, І.Г. Леонов, Д.В. Карлов, І.А. Нос

Розглядаються особливості висування вимог точності целеуказування зенітному ракетному комплексу прикриття екологічно небезпечного об'єкту. Основна увага приділена розгляду методики розрахунку допустимих помилок вимірювання різниці куткових координат цілі та ракети в зенітному ракетному комплексі з телекеруванням, що використовує триточковий метод наведення. Отримано співвідношення, що дозволяє оцінити необхідну точність вимірювання різниці куткових координат цілі і ракети для забезпечення заданої вірогідності ураження цілі однією ракетою при фіксованій дальності від цілі до ракети.

**Ключові слова:** зенітний ракетний комплекс, целеуказування, одиночна ціль, імовірність ураження одиночної цілі.

### THE PECULIARITIES OF DEMANDS TO TARGET DESIGNATION ACCURACY OF THE ANTI-AIRCRAFT GUIDED MISSILE SYSTEM FOR COVER ECOLOGICAL DANGEROUS OBJECT

M.M. Petrusenko, V.D. Karlov, I.G. Leonov, D.V. Karlov, I.A. Nos

The peculiarities of demands to target designation accuracy of the anti-aircraft guided missile system for cover ecological dangerous object are analyzed in this article. Main attention is spared to consideration of calculation procedure of the possible measurement errors of angular target co-ordinates differences and rocket in the anti-aircraft guided missile system with a tele-control, using the line-of-sight method of guidance. The correlation allows estimate necessary accuracy measurement of angular target co-ordinates differences and rocket for support one-missile kill probability at the fixed range from the target to the rocket.

**Keywords:** anti-aircraft guided missile system, target designation, single target, single target kill probability.