

УДК 629.76

**Разработка модели и алгоритма оценки эффективности преодоления гиперзвуковым летательным аппаратом противоракетной обороны с учетом противодействия авиационного комплекса**

**Баль М.А.**

*Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра*

*Великого, ул. Карбышева 8, Балашиха, Московская область, 143900, Россия*

*e-mail: [mba.87@yandex.ru](mailto:mba.87@yandex.ru)*

**Статья поступила 10.12.2019**

**Аннотация**

В статье предлагается усовершенствованная модель и алгоритм оценки эффективности преодоления гиперзвуковым летательным аппаратом противоракетной обороны с учетом противодействия авиационного комплекса. Для оценки эффективности преодоления предложена соответствующая модель действия авиационного комплекса противоракетной обороны. Обоснована постановка матричной игры между гиперзвуковым летательным аппаратом и противоракетой авиационного комплекса с заполнением матрицы эффективности для последующего выбора наиболее эффективной с точки зрения преодоления противоракетной обороны траектории полета. Актуальность разработанной модели и алгоритма подчеркиваются тем, что они могут быть использованы для моделирования процесса преодоления и оценки эффективности преодоления гиперзвуковым летательным аппаратом противоракетной обороны с учетом противодействия авиационного комплекса при любом варианте.

**Ключевые слова:** гиперзвуковой летательный аппарат, авиационный комплекс, модель оценки эффективности.

### Введение

Гиперзвуковые летательные аппараты (ГЛА), обладающие необходимым аэробаллистическим качеством и способные совершать атмосферное маневрирование на достаточно больших дальностях от защищаемого объекта, являются достаточно эффективными средствами поражения целей, прикрываемых современными и перспективными противоракетными комплексами (ПРК) системы противоракетной обороны (ПРО) [1,2].

Идея введения в систему ПРО авиационной компоненты не нова. Ранее [3] рассматривалась возможность уничтожения космических аппаратом (КА) ракетами, запускаемыми с авиационных комплексов (АК). Так как КА перемещаются в настоящее время по траекториям с вычисляемыми параметрами, целенаведение на них рассматривается как устойчивое.

Применительно к ГЛА задача их уничтожения с использованием АК ПРО, очевидно, будет значительно более сложной. Тем не менее, она принципиально выполнима, и в отдельных случаях ее выполнение с точки зрения противника может быть более эффективным, чем наземными и (или) морскими комплексами ПРО.

Таким образом, имеет место объективная необходимость повышения эффективности преодоления ПРО и отсутствие в существующих вариантах преодоления ГЛА ПРО учета противодействия со стороны АК. Решение о создании

АК ПРО США принято в соответствии с утвержденной концепцией развития ПВО и ПРО США до 2028 и концепцией применения воздушных средств поражения для решения задач ПРО – Единая программа «Airborne Weaponry Layer (AWL)» [3,4]. Названные обстоятельства подтверждают актуальность проводимых исследований.

В рамках проводимых работ по анализу данной предметной области, не удалось найти работ, связанных с оценкой эффективности применения против ГЛА авиационных комплексов, которые, очевидно, будут включены в перспективную систему ПРО противника в ближайшие годы [3,4].

Таким образом, возникает необходимость разработки модели и алгоритма оценки эффективности преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия ПРО. Перейдем к краткой обобщенной постановке задачи.

### Постановка задачи

I. Дано:

1. Математическая модель движения аэробаллистического ГЛА  $Y^T$  и средства перехвата (противоракеты)  $Y^{PP}$  в относительной условно-прямоугольной системе координат  $OXYZ$ , связанной с Землёй, где  $O$  – конечная точка полета ГЛА,  $OX$  – криволинейная ось отчета дальности полета ГЛА,  $OY$  – ось отчета высот,  $OZ$  – ось отчета боковых отклонений, дополняет до правой.

2. Показатель эффективности преодоления ПРО ГЛА:

- $\Delta r_B$  величина промаха противоракеты ПРК ПРО относительно ГЛА;
- $p_{HP}$  вероятность непоражения ГЛА при преодолении ПРО

3. Множество расчетных траекторий полета ГЛА для данной цели  $\{tr_k\}, k \in K^*$  -, где  $K^*$  - параметр, определяемый после проведения баллистической фильтрации траекторий.

4. Характеристики ПРО:

$m$  - количество ПРК,  $n$  - количество средств перехвата (противоракет);

$\{ch_e\}, \{mr_e\}, e \in E^*$  - множества мест расположения и характеристик ПРК ПРО,

где  $E^*$  параметр, определяется из анализа базы данных ПРО противника.

5. Множество допустимых траекторий полета ГЛА с заданными параметрами маневрирования  $\{U_i^{доп}\}, i = \overline{1, M}$  и вариантов расположения ПРК,  $\{V_j^{доп}\}, j = \overline{1, N}$  -

где,  $M = \{tr_k\}, N = \{ch_e, mr_e\}$ .

II. Ограничения и допущения:

1. Закон поражения цели ПРК ПРО определяется по закону Релея.

2.  $\Delta r_{доп}$  - значение допустимого промаха для ГЛА при наведении на него средства перехвата (противоракеты) на момент подрыва боевой части.

III. Критерий:

Максимизировать значение вероятности непоражения ГЛА в процессе преодоления ПРО при обеспечении требуемой величины вынужденного промаха противоракеты  $\Delta r_B$ :

$$\begin{cases} P_{НП} \rightarrow \max \\ \Delta r_B \geq \Delta r_B^{доп} \end{cases} \quad (1)$$

IV. Требуется:

Разработать модель и алгоритм оценки эффективности преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия АК, позволяющий, по данным (I), с учетом допущений и ограничений (II) и на основании критерия (III) определить значения показателя эффективности преодоления ГЛА ПРО ( $p_{НП}$ ).

Возможных вариантов задания движения ГЛА и противоракет достаточно много [4-8]. Поэтому необходимо определить ограниченное множество стратегии каждого объекта. Согласно теории матричных игр, ограниченное множество позволит сформировать матричную игру в чистых стратегиях и составить платежную матрицу.

Разработанная модель оценки эффективности преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия АК функционально содержит следующие процедуры:

1. Задание множеств стратегий сторон при противодействии ГЛА и ПРО.
2. Математическое моделирование процесса преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия АК на ЭВМ и получение численных результатов значений показателей эффективности.
3. Формирование платежной матрицы эффективности преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия АК.

Предлагаются следующие алгоритмы задания стратегий сторон при противодействии ГЛА и противоракеты.

Алгоритм задания множества стратегий ГЛА:

1. Задается класс противоперехватных маневров на заданном участке полета.

Определяются виды противоперехватных маневров, которые могут быть реализованы ГЛА на соответствующих типовых участках полета с учетом конструктивно-баллистических ограничений (КБО) и тактических требований. Количество вариантов стратегий, задаваемых различным видом противоперехватных маневров для соответствующего участка полета, составляет  $M^M$ .

2. Задается множество стратегий, в зависимости от значений параметров противоперехватных маневров:

Количество вариантов, задаваемых стратегиями при изменении параметров противоперехватного маневра на  $U$ -м участке будет равно:

$$M^U = M^I \cdot M^{II} \cdot \dots \cdot M^S, \quad (2)$$

где  $M^I, M^{II}, \dots, M^S$  - количество вариантов, задаваемых  $S$  – параметрами траектории для каждого  $U$ -го участка, в качестве которых может выступать угол пути, угол наклона траектории, количество полупериодов квазиколебаний, амплитуда бокового отклонения и тд.

3. Определяется количество вариантов стратегий для ГЛА на заданной траектории:

$$M = \sum_{i=1}^{M_M} M^{U_i} \quad (3)$$

Алгоритм задания множества стратегий ПРК.

1. Задается множество стратегий в зависимости от места точки старта противоракеты относительно конечной точки полета ГЛА.

$$N_Z^x = N_Z^I N_Z^{II},$$

(4)

где в качестве I и II могут выступать параметры шагов дискретности азимута и расстояния.

2. Задается множество стратегий по выбору рубежа перехвата.

По результатам моделирования перехвата ГЛА противоракетой выбирается такая удаленность рубежа перехвата, которая исключает возможный срыв наведения

$$L_Z^{min} \leq L_Z \leq L_Z^{max}; H_Z^{min} \leq H_Z \leq H_Z^{max} - \text{ по дальности и высоте соответственно.}$$

Количество вариантов, задаваемых стратегиями выбора рубежа перехвата, будет соответствовать количеству рубежей перехвата –  $N_Z^r$ .

3. Определяется количество вариантов задания стратегий для комплекса:

$$N_{ZK} = N_Z^x N_Z^r \tag{5}$$

Сформированный полный набор множества стратегий ГЛА и ПРК определит процесс преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия АК как матричную игру в чистых стратегиях.

По результатам моделирования процесса преодоления ГЛА ПРО на ЭВМ получаем величину промаха, принятую за показатель эффективности преодоления ГЛА ПРО. Далее для определения другого показателя – вероятности непоражения ГЛА, требуется определить связь  $\Delta r_B$  и  $p_{НП}$ .

Для огневых средств АК ПРО вероятность поражения цели  $P_n$  определяют по закону Релея:

$$P_n = \frac{1}{1 - \overline{\sigma_{\delta r}}^2} \cdot \exp\left(-\frac{\overline{\Delta r_B}^{-2}}{2(1 - \overline{\sigma_{\delta r}}^2)}\right) \quad (6)$$

где  $P_n$  - вероятность поражения ГЛА;

$$\overline{\Delta r_B} = \frac{\Delta r_B}{R_0}; \overline{\sigma} = \frac{\sigma}{R_0} - \text{нормированные значения систематической составляющей}$$

промаха и среднеквадратической ошибки наведения,  $\Delta r_B$  - промах (отклонение противоракеты от ГЛА на момент подрыва заряда ее боевой части);  $R_0$  - параметр условного закона поражения цели.

Поскольку было принято допущение об идеальном управлении, то принимается, что среднеквадратическая ошибка наведения равна нулю.

Приближенное значение параметра  $R_0$  рассчитывается по формуле:

$$R_0 = k \sqrt{m_{\delta z}}, \quad (7)$$

где  $m_{\delta z}$  - масса заряда боевой части противоракеты;  $k$  - коэффициент, обобщенно учитывающий тип заряда, условий встречи с целью и уязвимости цели.

Для ГЛА, как для ЛА его размеров [4], принимается  $k = 1,1$

Вероятность непоражения ГЛА:

$$P_{nm} = 1 - P_n$$

(8)

Вероятность непоражения ГЛА с учетом принятых допущениях по результатам моделирования каждого варианта перехвата ГЛА противоракетой будем рассчитывать по формуле:

$$P_{nn} = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta r_B^2}{2k^2 m}\right)$$

(9)

После проведения моделирования и получения численных результатов при всех заданных стратегиях противников получим платежную матрицу как результат разработанной модели оценки эффективности преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия АК.

Алгоритм оценки эффективности преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия АК представлен на рисунке 1 и включает следующую последовательность действий:

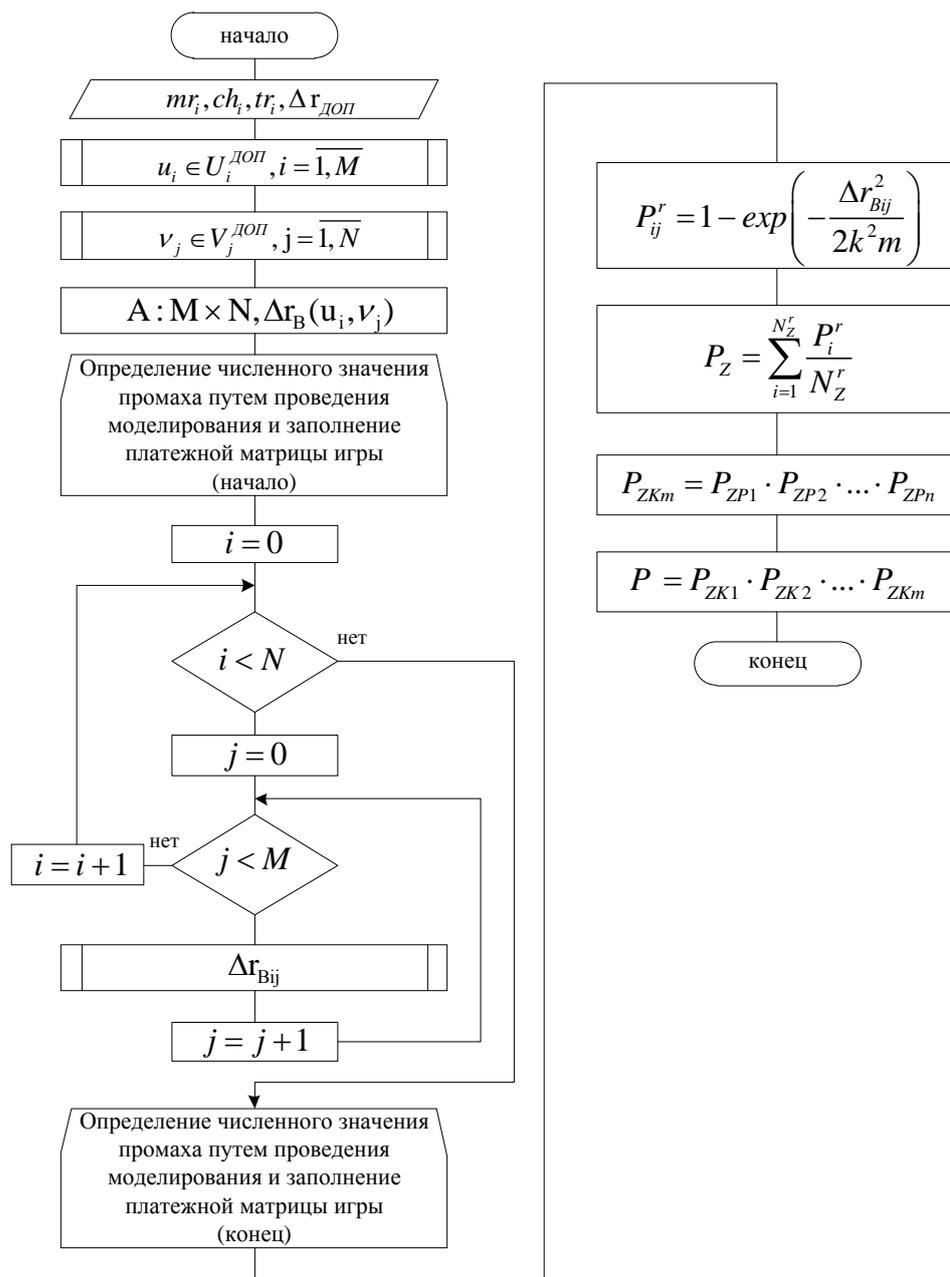


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма оценки эффективности преодоления ГЛА  
ПРО с учетом противодействия АК

1. Задаются исходные данные, необходимые для определения стратегий сторон. Для ПРК из базы данных ПРО противника определяется местоположение  $\{mr_i\}$  и характеристики  $\{ch_i\}$ . Для ГЛА после баллистической фильтрации определяются располагаемые траектории полета  $\{tr_i\}$  с учетом поражения

соответствующей цели. Задается значение допустимого промаха  $\Delta r_{ДОП}$  наводимой противоракеты на ГЛА.

2. Формируется множество допустимых траекторий полета ГЛА с заданными параметрами маневрирования  $\{U_i^{ДОП}\}$  и вариантов расположения АК  $\{V_j^{ДОП}\}$ .

3. Качественно и количественно задаются стратегии сторон в процессе преодоления ГЛА ПРО с учетом противодействия АК:

$$u_i \in U_i^{ДОП}, i = \overline{1, M} - \text{стратегии ГЛА};$$

$$v_j \in V_j^{ДОП}, j = \overline{1, N} - \text{стратегии ПРК}.$$

При неизвестном расположении ПРК количество их стратегий определяется как  $N_{ЗК} = N_Z^x N_Z^r$ , что соответствует постановке «общей задаче».

При известном расположении ПРК количество их стратегий определяется только рубежами перехвата  $N_{ЗК} = N_Z^r$  - «частная задача».

4. После задания стратегии ГЛА и ПРК (стратегии игроков) составляется платежная матрица  $A: M \times N$ , элементами которой являются результаты отдельных партий игры, в нашем случае – это результаты отдельных реализаций моделирования перехвата ГЛА противоракетой АК ПРО.

Платежная матрица, определенная заданными ранее стратегиями, будет иметь вид:  $A_{M \times N} = M \times N_{ЗК}$ .

5. Для заполнения платежной матрицы необходимо определить параметр, который будет являться платой игры. В качестве платы игры предлагается использовать не вероятность непоражения ГЛА, а вынужденный промах  $\Delta r_B$ . При

этом решение матричной игры не изменится, так как с увеличением  $\Delta r_B$  будет увеличиваться  $P_{III}$ . Выбор  $\Delta r_B$  в качестве платы игры обусловлен следующими достоинствами:

- простота вычислений (после получения  $\Delta r_B$  не требуется никаких дополнительных вычислений) - при составлении больших матриц это может быть существенно;
- результат платы игры при  $\Delta r_B$  точнее, чем при  $P_{III}$ ; т.к. не делается дополнительных пересчетов, и величины лежат в области  $0 \leq P_{III} \leq 1, 0 \leq \Delta r_B < \infty$ .

После проведения численного эксперимента для соответствующих стратегий, выступающей в качестве игры, определяются численные значения промаха и заносятся в платежную матрицу. Платежная матрица игры представляет собой таблицу, в первой строке которой записываются фиксированные стратегии АК  $v_j$ , а в первом столбце – стратегии ГЛА  $u_i$ . В каждой клетке на пересечении соответствующих стратегий записывается значение вынужденного промаха  $\Delta r_B(u_i, v_j)$ .

6. Находится общая вероятность  $P_{ZP}$  преодоления ГЛА каждой ПУ (т.е. точки старта противоракеты) на заданных рубежах перехвата. Для этого воспользуемся теоремой умножения вероятностей для независимых событий:  $P(AB) = P(A) \cdot P(B)$

Тогда

$$P_{ZP1} = P_{Z1} \cdot P_{Z2} \cdot \dots \cdot P_{Zn};$$

$$P_{ZP2} = P_{Z1} \cdot P_{Z2} \cdot \dots \cdot P_{Zn};$$

.....

$$P_{ZPm} = P_{Z1} \cdot P_{Z2} \cdot \dots \cdot P_{Zn};$$

где  $n$  - количество противоракет пущенных по ГЛА,  $m$  - количество точек старта противоракет.

Для нахождения  $P_Z$  воспользуемся формулой нахождения общей вероятности:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i) P\left(\frac{A}{H_i}\right) \quad (10)$$

Тогда

$$P_Z = \sum_{i=1}^{N_Z^r} \frac{P_i^r}{N_Z^r} \quad (11)$$

где  $P^r = P_{HI}$  определяется по формуле (9).

11. Находится общая вероятность  $P_{ZK}$  преодоления ГЛА всех ПУ (точек старта противоракет) каждого ПРК (в том числе АК):

$$P_{ZK1} = P_{ZP1} \cdot P_{ZP2} \cdot \dots \cdot P_{ZPn};$$

$$P_{ZK2} = P_{ZP1} \cdot P_{ZP2} \cdot \dots \cdot P_{ZPn};$$

.....

$$P_{ZKm} = P_{ZP1} \cdot P_{ZP2} \cdot \dots \cdot P_{ZPn};$$

где  $n$  - количество носителей,  $m$  - количество ПРК.

12. Находится вероятность преодоления ГЛА при прохождении всей траектории полета  $P$  с учетом противодействия всех ПРК:

$$P = P_{ZK1} \cdot P_{ZK2} \cdot \dots \cdot P_{ZKm} \quad (12)$$

Для проведения численных экспериментов по перехвату ГЛА в полном объеме необходимо максимально полное заполнение платёжной матрицы игры.

### **Заключение**

Разработанная модель может быть использована для моделирования процесса преодоления ГЛА ПРО в условиях противодействия АК, оценки эффективности преодоления, поиска оптимальной траектории полета ГЛА, т.е. содержащей наиболее эффективные противоперехватные маневры ГЛА при любом варианте действий ПРК ПРО.

### **Библиографический список**

1. Титков О.С. Особенности гиперзвуковых маневрирующих боевых частей летательных аппаратов в проекте быстрого глобального удара // *Авиационные системы*. 2017. № 7. С. 32 - 37.
2. Лысенко Л.Н. Анализ эффективности применения аэродинамического маневрирования ГЧ БРДД в качестве средства преодоления систем противоракетной обороны // *Военно-промышленный курьер*. 2005. № 1 (61). С. 5.
3. Федосов Е.А. Разработка в США концепции и элементов системы ПРО авиационного базирования. – М.: ГосНИИАС, 2014. – 63 с.
4. Ашурбейли И.Р. Средства воздушно-космического нападения и воздушно-космической обороны. Состояние и развитие. – М.: Планета, 2017. – 336 с.

5. Горченко Л.Д., Евсеев И.В., Мишин А.А. Моделирование конфликтных ситуаций между планирующим летательным аппаратом и зенитной управляемой ракетой-перехватчиком // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 137. № 6. С. 23 - 30.
6. Панов В.В., Горчица Г.И., Балыко Ю.П. и др. Формирование рационального облика перспективных авиационных систем и комплексов. - М.: Машиностроение, 2010. – 157 с.
7. Архангельский И.И., Афанасьев П.П., Голубев И.С. и др. Проектирование зенитных управляемых ракет. - М.: Изд-во МАИ, 2001. – 730 с.
8. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитными ракетами. - М.: Воениздат, 1991. – 343 с.
9. Оркин Б.Д., Оркин С.Д., Дьячук А.К. Структура алгоритма целераспределения средств противовоздушной обороны корабельной группы // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35531>
10. Обносов Б.В., Данеко А.И., Захаров И.В., Трубников А.А., Решетников Д.А. Функциональный контроль подсистем ракеты класса «воздух-воздух» малой дальности // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35574>
11. Айден К., Фибельман Х., Крамер М. Аппаратные средства РС. - СПб.: Изд-во ВНУ, 1996. – 544 с.
12. Новые средства ведения радиоэлектронной борьбы // Зарубежное военное обозрение. 2014. № 1. URL: <http://www.zvo.su/VVS/novye-sredstva-vedeniya-radioelektronnoy-borby.html>

13. Филатов В.И. Перспектива развития средств РЭБ // 3-й Международный научный симпозиум «Специальная связь и безопасность информации: технологии, управление, экономика»: сборник трудов (Терскол, 25-28 апреля 2014). – М.: Русайнс, 2017. С. 109 - 111.
14. Акуличев А.Б. Проблемы цифровизации военных сетей связи и пути их решения // Военная мысль. 2006. № 9. С. 76 – 80.
15. Давыдов Г.Б. Информация и сети связи. - М.: Наука, 1984. – 128 с.
16. Крушевский А.В. Теория игр. – Киев: Вища школа, 1977. – 216 с.
17. Пенин П.И. Системы передачи цифровой информации. – М.: Советское Радио, 1976. – 364 с.
18. Хохлачев Е.Н. Оптимизация затрат при обеспечении живучести наземных объектов системы управления спутниками // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2010. №1 (3). С. 36 – 43.
19. Кузнецов И.Н. Информация: сбор, защита, анализ. - М.: Изд -во Яуза, 2001. - 107 с.
20. Дьяконов В.П., Образцов А.А., Смердов В.Ю. Электронные средства связи. М.: СОЛОН-Пресс, 2009. – 430 с.