

А.Ю. Рыков, С.Т. Балаян, А.А. Карпинский

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППИРОВКИ АВИАЦИОННЫХ ПРОТИВОКОРАБЕЛЬНЫХ РАКЕТ

*В статье произведена оценка эффективности взаимодействия группировки авиационных противокорабельных ракет и системы противовоздушной обороны корабельной группы. При получении оценки числа оставшихся кораблей после взаимодействия с группировкой авиационных противокорабельных ракет в показатели качества входят непрерывное значение ущерба по каждому кораблю в зависимости от конфигурации группировки авиационных противокорабельных ракет и корабельной группы, вероятности воздействия активных объектов группировки авиационных противокорабельных ракет на каждый из кораблей.*

**Ключевые слова:** математическая модель, оптимизация, прогноз, оценка, весовой коэффициент, показатель эффективности.

A.Y. Rykov, S.T. Balanyan, A.A. Karpinskiy

## FUNCTIONAL EFFICIENCY EVALUATION MODEL OF INTERACTION ANTI-SHIP MISSILES GROUP

*The article assesses the effectiveness of airborne anti-ship missiles group and group of shipborne anti-aircraft defense system. When an estimate of number of remaining ships after interaction with group of airborne anti-ship missiles, quality indicators includes continuous value of damage on every ship, depending on the configuration of airborne anti-ship missiles exposure active group of objects on every ship.*

**Keywords:** mathematical model, optimization, forecast, assessment, weight coefficient, performance indicator.

Оценка эффективности взаимодействия группировки авиационных противокорабельных ракет (АПКР) и системы противовоздушной обороны (ПВО) корабельной группы (КГ) представляет собой задачу формирования в общем случае векторного показателя эффективности, получения ряда его значений при моделировании заданного числа реализаций взаимодействия с последующей статистической обработкой результатов моделирования. Для этого используется метод статистического моделирования Монте-Карло [1].

Существуют различные критерии оценки функциональной эффективности (ОФЭ) в зависимости от содержания задачи исследования. Например, для КГ можно выделить следующие показатели:

- доли сбитых и уцелевших самолетов;
- доли сбитых АПКР с активным и пассивным наведением;
- доли средств, сбитых до и после пуска;
- количество израсходованных средств зенитных управляемых ракет (ЗУР) КГ;
- предотвращенный ущерб по конкретной группировке АПКР;
- распределение ресурсов АПКР по объектам КГ.

© Рыков А.Ю., Балаян С.Т., Карпинский А.А., 2018.

Основными проблемами при решении задач по оценке функциональной эффективности являются:

1) многообразие действий в операциях, сопровождающихся элементами случайности, что порождает неопределенность в результатах оценок;

2) многоплановость показателей ОФЭ и, как следствие, сложность принятия однозначного решения по анализируемым типам конфигураций кораблей.

Решение первой проблемы осуществляется на основе имитационного моделирования, формализующего реальные явления с заранее обусловленными ограничениями и допущениями. Для раскрытия неопределенности, порожденной вероятностным характером ряда событий, дополнительно используется статистическая обработка данных, накопленных в ходе некоторого числа реализаций имитационного моделирования.

Решение второй проблемы основано на том, что критериальная оценка должна удовлетворять следующим требованиям: быть мерой успешности выполнения операции воздействия группировки АПКР на КГ и соответствовать цели решаемой задачи.

При оценке больших по объему и сложных по физической сущности явлений (таких как авиационный удар) мера успешности их выполнения характеризуется несколькими частными показателями эффективности, которые сводятся в две группы.

1. Показатели, характеризующие нанесенный ущерб (потери КГ):

- состав и структура КГ;
- количество произведенных пусков с каждого корабля;
- количество попавших АПКР в каждый корабль;
- характер нанесенного повреждения кораблям.

2. Показатели, определяющие ущерб (потери группировки АПКР):

- состав и структура группировки АПКР;
- количество объектов АПКР по типам средств;
- количество АПКР, выполнивших боевую задачу.

Частные показатели эффективности характеризуют средние численности групп объектов группировок, т.е. математическое ожидание количества и доли кораблей КГ и типов групп объектов группировки АПКР с той или иной степенью повреждения или выполненной задачей относительно исходных численностей.

При анализе конфликтного взаимодействия авиационной и морской группировок возникает задача оценки эффективности противодействия в конфликтной ситуации. Показатели качества систем при этом должны отражать как оценку эффективности собственных действий при организации воздействия на противника, так и оценку планируемого воздействия.

Предлагается следующий набор тактических показателей, который достаточно разнообразен и отражает тенденцию основной тактической цели. Показатели подразделяются на интегральные, терминальные, текущие и комбинированные, которые для группировки АПКР и КГ подобны. Основные интегральные тактические показатели системы могут иметь следующий смысл (далее  $\tilde{x}_i(t) = x_i(t)/x_i(0)$ , где величины  $x_i(t)$  имеют смысл численностей групп объектов определенного типа, входящих в систему;  $\gamma_i$  – соответствующие весовые коэффициенты, характеризующие приоритет при оценке эффективности по определенным типам групп объектов систем).

1. Перевес в числе активных объектов (АО) (АПКР, непосредственно воздействующие на КГ):

$$J_{\text{АПКР}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{АО}}} \gamma_i \int_0^T [\tilde{x}_{\text{АПКР}}(t) - \tilde{x}_{\text{АО}}^{\text{КГ}}(t)] dt \rightarrow \max;$$

– контроль скорости убывания активных объектов:

$$J_{\text{АПКР}} = \int_0^T \left[ \sum_{i=1}^{n_{\text{АО}}} \gamma_i (\dot{\tilde{x}}_{\text{АО}}^{\text{АПКР}}(t))^2 \right] dt \rightarrow \min.$$

В качестве терминальных показателей можно отметить следующий:

– взвешенная разность между количеством непораженных активных или пассивных объектов (ПО) при окончании взаимодействия:

$$J_{\text{АПКР}} = \alpha_1 \sum_{i=1}^{n_{\text{АО}}} \gamma_i \tilde{x}_{\text{АО}i}^{\text{АПКР}}(T) - \alpha_2 \sum_{i=1}^{n_{\text{АО}}} \gamma_i \tilde{x}_{\text{АО}i}^{\text{КГ}}(T) \rightarrow \max;$$

$$J_{\text{АПКР}} = \alpha_1 \sum_{i=1}^{n_{\text{ПО}}} \gamma_i \tilde{x}_{\text{ПО}i}^{\text{АПКР}}(T) - \alpha_2 \sum_{i=1}^{n_{\text{ПО}}} \gamma_i \tilde{x}_{\text{ПО}i}^{\text{КГ}}(T) \rightarrow \max.$$

2. Взвешенный терминальный перевес в линейной и квадратичной формах по соответствующим типам взаимодействующих групп объектов систем [2]:

$$J_{\text{АПКР}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{тип}}} \gamma_i \left[ \tilde{x}_{\text{тип}i}^{\text{КГ}}(T) - \tilde{x}_{\text{тип}i}^{\text{АПКР}}(T) \right] \rightarrow \min;$$

$$J_{\text{АПКР}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{тип}}} \gamma_i \left[ (\tilde{x}_{\text{тип}i}^{\text{КГ}}(T))^2 - (\tilde{x}_{\text{тип}i}^{\text{АПКР}}(T))^2 \right] \rightarrow \min.$$

3. Взвешенное количество непораженных средств противника:

$$J_{\text{АПКР}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{тип}}} \gamma_i (\tilde{x}_{\text{тип}i}^{\text{КГ}}(T))^2 \rightarrow \min.$$

Наиболее типичными показателями оценки эффективности являются функционалы квадратичного вида, характеризующие терминальный перевес в численности соответствующих типов средств, участвующих в конфликтном взаимодействии (например, по активным и пассивным объектам систем), на момент окончания взаимодействия. Обобщенные показатели качества систем можно сформировать в следующем виде [3]:

$$\begin{aligned} J_{\text{АПКР}} = & \alpha_1 \left[ \frac{1}{n_{\text{АО}}^{\text{КГ}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{АО}}^{\text{КГ}}} (\tilde{x}_{\text{АО}i}^{\text{КГ}}(T))^2 - \frac{1}{n_{\text{АО}}^{\text{АПКР}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{АО}}^{\text{АПКР}}} (\tilde{x}_{\text{АО}i}^{\text{АПКР}}(T))^2 \right] + \\ & + \alpha_2 \left[ \frac{1}{n_{\text{ПО}}^{\text{КГ}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{ПО}}^{\text{КГ}}} (\tilde{x}_{\text{ПО}i}^{\text{КГ}}(T))^2 - \frac{1}{n_{\text{ПО}}^{\text{АПКР}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{ПО}}^{\text{АПКР}}} (\tilde{x}_{\text{ПО}i}^{\text{АПКР}}(T))^2 \right] + \\ & + \alpha_3 \left[ \tilde{x}_{\text{АПКР(н)}}(T)(M_1 - 1,5)^2 + \tilde{x}_{\text{АПКР(а)}}(T)(M_2 - 1,5)^2 \right] - \alpha_4 \sum U_i \rightarrow \min; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{\text{КГ}} = & \beta_1 \left[ \frac{1}{n_{\text{АО}}^{\text{АПКР}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{АО}}^{\text{АПКР}}} (\tilde{x}_{\text{АО}i}^{\text{АПКР}}(T))^2 - \frac{1}{n_{\text{АО}}^{\text{КГ}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{АО}}^{\text{КГ}}} (\tilde{x}_{\text{АО}i}^{\text{КГ}}(T))^2 \right] + \\ & + \beta_2 \left[ \frac{1}{n_{\text{ПО}}^{\text{АПКР}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{ПО}}^{\text{АПКР}}} (\tilde{x}_{\text{ПО}i}^{\text{АПКР}}(T))^2 - \frac{1}{n_{\text{ПО}}^{\text{КГ}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{ПО}}^{\text{КГ}}} (\tilde{x}_{\text{ПО}i}^{\text{КГ}}(T))^2 \right] + \beta_3 \sum U_i \rightarrow \min; \end{aligned}$$

$$\tilde{x}_i(1) = x_i(1)/x_i(0);$$

$$\sum \beta_i = 1, 0 \leq \beta_i \leq 1; \sum \alpha_i = 1, 0 \leq \alpha_i \leq 1,$$

где  $M_1, M_2$  – предполагаемые мощности налета для групп объектов с пассивным и активным наведением (рассматривается вариант  $M_1 = M_2 \leq 2$  – потенциально возможное максимальное превышение числа активных объектов группировки АПКР).

Под мощностью группировки АПКР подразумевается насыщение группировки активными средствами за счет дополнительных пусков ракет с потенциальных носителей ракет – самолетов как пассивных объектов группировки.

Коэффициенты  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  имеют смысл тактических приоритетов при оценке эффективности действий по определенным типам групп объектов систем. Существенным элементом тактического прогноза действий зенитного ракетного комплекса (ЗРК) корабля является преимущественное уничтожение активных объектов группировки АПКР, поэтому  $\beta_1 > \beta_2$ .

Наоборот, существенным элементом тактического прогноза действий группировки АПКР является потопление корабля, следовательно,  $\alpha_2 > \alpha_1$ ; выбор тактики также может являться в задаче прогноза одной из сторон оптимизации управляющих параметров систем, когда каждая сторона дополнительно оптимизирует свои действия при наличии определенного количества активных и пассивных объектов противника, особенно если есть управляемая мощность со стороны группировки АПКР.

Слагаемое  $\sum U_i$  отражает минимизацию показателя непредотвращенного ущерба по оставшимся объектам группировки АПКР после такта взаимодействия для КГ и максимизации – для группировки АПКР.

В качестве потенциально возможного ущерба  $U_i$  (при отсутствии базы данных по данному параметру) был выбран фактор подлетного времени как относительно более важный параметр, характеризующий опасность объектов группировки АПКР: значение  $U_i$  принималось равным значению нормированного вектора, построенного по критерию подлетного времени в методе анализа иерархий.

Приведенные выше обобщенные показатели эффективности могут быть дополнены известными статистическими компонентами, позволяющими по единой схеме получить оценку ущерба с учетом ранга (важности) поражаемого корабля.

1. Математическое ожидание количества кораблей, получивших  $j$ -ю степень повреждения:

$$M_j = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} n_{j_i},$$

где  $n_{j_i}$  – количество кораблей ордера, получивших  $j$ -ю степень повреждения (используется сетка: 1 – уничтожен, 2 – поврежден тяжело, 3 – поврежден легко);  $N_i$  – количество реализаций операции воздействия группировки АПКР на КГ.

2. Математическое ожидание доли кораблей ордера, получивших  $j$ -ю степень повреждения (в %):

$$P_j = \frac{100}{N_i N_k} \sum_{i=1}^{N_i} n_{j_i}, \text{ или } P_j = \frac{M_j \cdot 100}{N_k},$$

где  $N_k$  – количество кораблей в соединении.

3. Математическое ожидание количества кораблей класса  $k$ , получивших  $j$ -ю степень повреждения (по типам кораблей в соединении):

$$M_{k_j} = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} n_{kj_i},$$

где  $n_{kj_i}$  – количество кораблей класса  $k$ ;  $k$  – индекс класса корабля (в общем случае: 1 – авианосец, 2 – линейный корабль, 3 – эсминец, 4 – транспорт, 5 – крейсер, 6 – штабной корабль).

4. Математическое ожидание оценки нанесенного ущерба КГ по  $j$ -й степени повреждения с учетом ранга кораблей:

$$M_{U_j} = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \tilde{U}_{j_i};$$

$$\tilde{U}_j = \frac{U_j}{U_{\max}},$$

где  $\tilde{U}_{j_i}$  – нормированное значение оценки ущерба в  $i$ -й реализации;  $U_j$  – реализуемое значение оценки ущерба;  $U_{\max}$  – максимально возможное значение оценки ущерба (для модифицированной модели конфликта данное значение задается как максимально возможное число пробоин корабля, которое позволяет судить о потере его живучести).

Величина  $U_j$  является аддитивным показателем, который выражает суммарное количество кораблей ордера, получивших  $j$ -ю степень повреждения, с учетом важности корабля:

$$U_j = \sum_{i=1}^6 n_k G_r,$$

где  $G_r$  – весовой коэффициент, характеризующий важность корабля класса  $k$ , имеющего ранг  $r$ .

Значения весовых коэффициентов важности могут определяться на основе теории принятия решений в условиях неопределенности. Предложено следующее экспертное ранжирование кораблей:

$$r_1 > r_2 > r_6 > r_4 > r_5 > r_3,$$

при следующих значениях рангов кораблей:  $r_1 = 1$  – авианосец,  $r_2 = 2$  – линейный корабль,  $r_6 = 3$  – штабной корабль,  $r_4 = 4$  – транспорт,  $r_5 = 5$  – крейсер,  $r_3 = 6$  – эсминец; оно позволяет генерировать значения стохастических весовых коэффициентов  $G_r \in [0, 1]$  в виде распределения Фишборна:

$$G_r = \frac{2(R - r_k + 1)}{R(R + 1)},$$

где  $R = 6$  – максимальное значение ранга кораблей.

Значение величины  $U_{\max}$  определяется аналогично для случая, когда все корабли получают  $j$ -ю степень повреждения. На основе изложенного метода рассчитываются три значения ущерба, соответствующие трем степеням повреждения. Недостаток данного метода – тот факт, что получаемая оценка является дискретной и обладает недостаточной информативностью.

Формализация учета степени нанесенного ущерба реализована посредством введения коэффициентов значимости соответствующих степеней поражения корабля. Целевая функция имеет следующий вид:

$$F_i = \sum_{j=1}^3 \tilde{U}_{j_i} G_j,$$

где  $G_j$  – весовой коэффициент, характеризующий  $j$ -ю степень повреждения, определяется соответствующим ранжированием:  $r_1 = 1$  – уничтожен,  $r_2 = 2$  – тяжело поврежден,  $r_3 = 3$  – легко поврежден.

Нормирование целевой функции проведено относительно весового коэффициента  $G_1$ , характеризующего максимальную степень повреждения, что позволяет получить значение комплексного показателя нанесенного ущерба на интервале  $[0, 1]$ :

$$\tilde{F}_i = F_i / G_1.$$

В итоге математическое ожидание комплексной оценки функциональной эффективности будет определяться отношением

$$M_F = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \tilde{F}_i.$$

При комплексном анализе взаимодействия практический интерес может представлять более детальная информация об эффективности воздействия группировки АПКР на КГ и наоборот, например: исходное количество АПКР в залпе; математическое ожидание количества АПКР, попавших в корабли, а также сбитых зенитными ракетными комплексами КГ; средняя численность групп АПКР, промахнувшихся по цели [4].

При получении оценки числа оставшихся кораблей после взаимодействия с группировкой АПКР в показатели качества входит непрерывное значение ущерба по каждому кораблю в зависимости от конфигурации группировки АПКР и КГ, вероятностей воздействия активных объектов группировки АПКР на каждый из кораблей. При построении показателей качества используются нормированные численности оставшихся средств обеих сторон на момент окончания взаимодействия, полученные на основе суммирования вероятностей воздействия по оптимальной матрице целераспределения (ЦР). Оценка эффективности собственно ЦР проводится по формируемому решению задачи назначения.

Обработка результатов ОФЭ на множестве реализаций моделирования взаимодействия группировки АПКР и КГ формируется на основе стандартных статистических оценок.

## Литература

1. *Кириллов В.И.* Теория боевой эффективности и исследование операций. Ч. II. М.: Монино, 1969. 412 с.

2. Методы оптимизации систем автоматического управления / Методы классической и современной теории автоматического управления: Т. 4. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 365–514.

3. *Дмитриевский А.А.* Прикладные задачи теории оптимального управления движением беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 327 с.

4. *Оркин Б.Д., Оркин С.Д.* Имитационное моделирование боевого функционирования палубных истребителей, зенитных ракетных и артиллерийских комплексов корабельных групп при решении задач ПВО: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ ПРИНТ, 2009. 214 с.

## References

1. *Kirillov V.I.* Teoriya boevoy effektivnosti i issledovanie operatsiy. Ch. II. M.: Monino, 1969. 412 s.

2. Metody optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya / Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: T. 4. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2004. S. 365–514.

3. *Dmitrievskiy A.A.* Prikladnyye zadachi teorii optimal'nogo upravleniya dvizheniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov. M.: Mashinostroenie, 1978. 327 s.

4. *Orkin B.D., Orkin S.D.* Imitatsionnoe modelirovanie boevogo funktsi-onirovaniya palubnykh istrebiteley, zenitnykh raketnykh i artilleriyskikh kompleksov korabel'nykh grupp pri reshenii zadach PVO: ucheb. posobie. M.: Izd-vo MAI PRINT, 2009. 214 s.