

Метод прогноза конфликтно-оптимального взаимодействия многорубежной ПВО и системы воздушного базирования на основе модели ЗРК «Пэтриот»

10, октябрь 2012

DOI: 10.7463/1012.0466556

Чжан Сяньцзянь

УДК 519.816

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ruszxj@gmail.com

Введение

Кроме сложной задачи принятия решения в работе учитываются элементы расширения “притягивающих многообразий” в форме законов управления ресурсами на основе многопрограммной асимптотики, обеспечивающие синтез в задаче прогноза, и устойчивые эффективные сбалансированные компромиссы, что составляет элементы интеллектуальных технологий управления.

К основным направлениям развития комплексов противовоздушной обороны (ПВО), создаваемых с использованием современных технологий, можно отнести следующие [1, 4, 5]:

- конструктивно-техническое совершенствование зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) на основе внедрения передовых технологий, обеспечивающих значительное повышение уровня тактико-технических характеристик (ТТХ) комплексов и придающих им новые качества;

- создание многоцелевых мобильных ЗРК ПВО большой и средней дальности, способных бороться как с аэродинамическими, так и с баллистическими целями

(тактическими, оперативно-тактическими ракетами и баллистическими ракетами средней дальности полета (до 3500 км) на конечных участках их траекторий);

- создание зонально-объектовых систем ПВО на театре военных действий, состоящих из двух рубежей обороны;

- создание мобильных ЗРК на театре военных действий, обеспечивающих эффективное прикрытие от баллистических ракет средней дальности полета.

ЗРК «Пэтриот», первоначальная модификация которого была принята на вооружение в 1982 г., относится к ЗРК средней дальности (СД) (дальность перехвата аэродинамических целей до 70 км). В то же время последующая модификация этого же ЗРК «Пэтриот» с усовершенствованной зенитной управляемой ракетой (ЗУР) PAC-2 (обеспечивает перехват тех же целей на дальностях до 150...160 км) относится уже к ЗРК большой дальности (БД).

Наиболее совершенным зарубежным ЗРК средней и большой дальности ПВО, способным решать задачи по отражению ударов современных и перспективных системы воздушного нападения (СВН), является ЗРК семейства «Пэтриот». В настоящее время этот комплекс состоит на вооружении армий США, ФРГ, Израиля, Греции, Нидерландов, Кувейта, Саудовской Аравии и Японии [1].

Комплекс «Пэтриот» с момента принятия его на вооружение в 1982 г. практически непрерывно совершенствуется. Проведено несколько его модернизаций и создан ряд модификаций этого комплекса.

Работа посвящена исследованию конфликтного взаимодействия системы многорубежной ПВО на основе модели ЗРК «Пэтриот» и системы воздушного базирования (СВБ) на основе комбинированного целераспределения (ЦР) прогноза динамики конфликта (ПДК) и текущих конфигураций систем, представляющих единую интегрированную систему функционально взаимосвязанных информационных, огневых средств, комплексов радиоэлектронного противодействия (РЭП) и радиоэлектронной борьбы (РЭБ) для решения задач ПВО [2, 4].

Цель работы: Разработка математических моделей и методов оптимизации управления ресурсами конфликтно-взаимодействующих систем в форме обобщенной структуры КС-ЦР-ОПДК на основе комбинации и развития методов распределения ресурсов для целераспределения (ЦР), оптимизации прогноза динамики конфликта (ОПДК) и учета конфигураций систем (КС) и их применение для повышения эффективности конфликтного взаимодействия систем управления ресурсами локальных

систем (ЛС) противовоздушной обороны наземной системы (ЛС ПВО) и авиационной группировки воздушного базирования (ЛС ВБ), с проведением многофакторного исследования эффективности взаимодействия систем с учетом специфики функционирования морской ЛС ПВО и авиационной ЛС ВБ, усложненной тактики в форме обобщенного предотвращаемого ущерба и насыщенного налета на основе применения и развития методов теории оптимизации управления ММС для этапа ОПДК с обобщением классов равновесных решений и модификации СТЭК.

Научная новизна работы:

- 1) впервые сформирована сложная математическая модель для исследования ММС функционирующие в условиях конфликта;
- 2) разработан комплексный алгоритм конфликтно-оптимального управления ресурсами КС-ЦР-ОПДК-РЭБ с учетом динамики КС, ЦР с развитием комбинированных методов принятия решения на основе размещения, векторного назначения и ранжирования, оптимальной ОПДК, динамики применения информационных средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Постановка задачи

В целом проблема разработки математической модели конфликтного противодействия системы ЗРК «Пэтриот» является достаточно сложной, так как присутствует наличие структурной и функциональной сложности противодействующих систем. В общем случае проявляется в структурной многоуровневой иерархии, в функциональной разнородности и многокритериальности задач, совместно решаемых на каждом из уровней.

Существенными факторами разработки математической модели конфликтного противодействия является учет характера противодействия от штатного до конфликтно-оптимального, учитывающего наилучшее поведение каждой из систем в конфликтной ситуации, и формирование методов прогноза динамики конфликта, повышающих эффективность управления ресурсами ПВО.

На рис. 1 представлена общая схема взаимодействия локальной системы воздушного базирования (ЛС ВБ) и ЛС ПВО на основе ЗРК «Пэтриот».

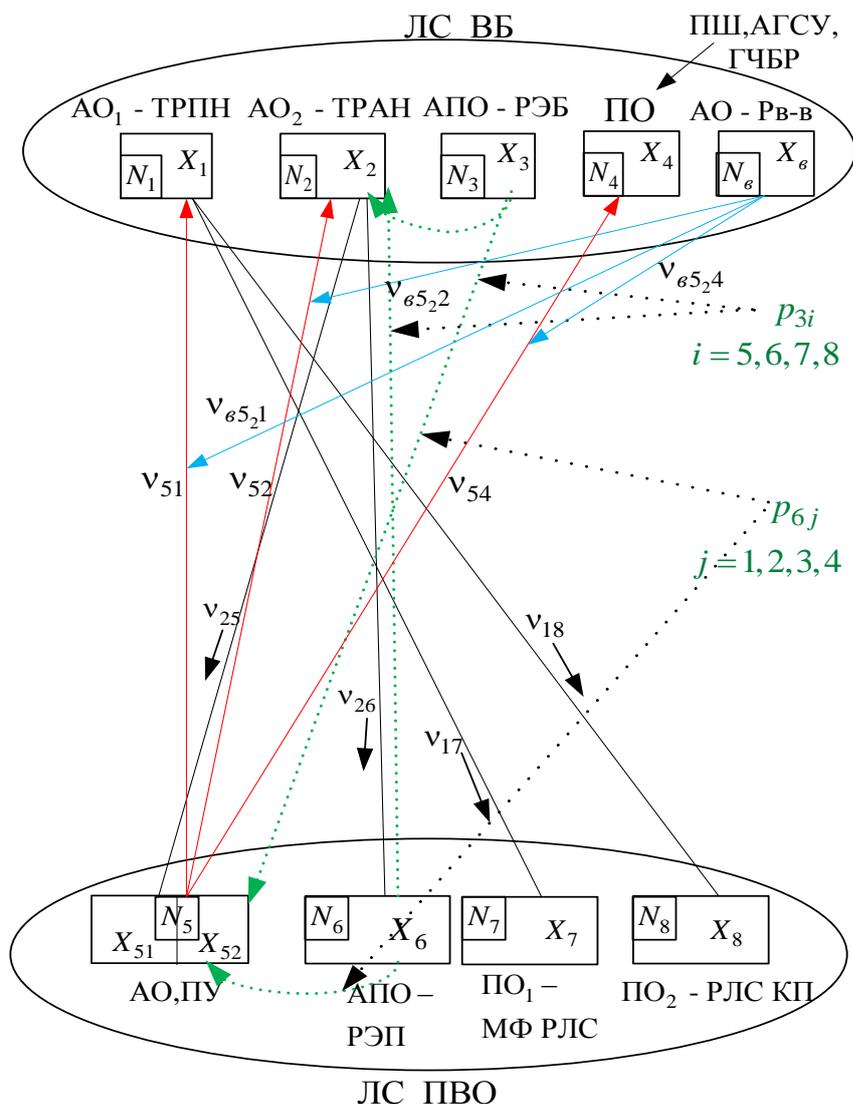


Рис. 1. Общая схема взаимодействия батареи ЗРК «Пэтриот» - ЛС ВБ

$x_i(N_i), i = \overline{1,8}, x_g(N_g)$ — текущая (начальная) численность, $x_i(t_0) = N_i, i = \overline{1,8}, x_g(t_0) = N_g$.

($\cdots \rightarrow$ — влияние вероятности поражения активных объектов (АО) ЛС ПВО и АО₂ ЛС ВБ при радиоэлектронной борьбе и радиоэлектронном противодействии)

На рис. 1: X_i — количество объектов каждого типа; v_{ij} — доли i -ых средств выделенные на поражение объектов j -го типа (управляющие параметры) с номинальной вероятностью поражения P_{ij} . Основная цель системы ПВО не пропустить пассивные объекты (ПО) ВБ до стратегических обороняемых земных объектов и сохранить собственную боеспособность для отражения дополнительного налета. В свою очередь ЛС ВБ стремится максимизировать количество пораженных наземных целей и создать коридор для прохождения ПО ВБ. На основе конфликтного противодействия составлены показатели

эффективности для враждующих группировок и сформирована задача конфликтного противодействия [2].

Групповой состав ЛС ВВ:

- $X_1(t_0)$ — количество тактических ракет пассивного наведения (ТРПН) в ЛС ВВ, нацеленных на поражение ПО ЛС ПВО;
- $X_2(t_0)$ — количество тактических ракет активного наведения (ТРАН) в ЛС ВВ, причем ракеты активного наведения могут быть нацелены на все наземные объекты ЛС ПВО, но с разными вероятностями их поражения;
- $X_3(t_0)$ — количество комплексов РЭБ (самолеты-постановщики помех), причем в конфликтной ситуации их воздействие влияет на вероятность поражения объектами ТРАН ЛС ВВ и АО ЛС ПВО;
- $X_4(t_0)$ — количество пассивных объектов ЛА ВВ: подразделение штурмовиков (ПШ), авиационная группа сетецентрического управления (АГСУ), головная часть баллистической ракеты (ГЧБР) и др., причем пассивные объекты ЛС ВВ, наносят максимальный поражающий урон тактическим наземным целям за линией ПВО;
- $X_6(t_0)$ — количество ракет воздух-воздух, которые предохраняют ТРПН, ТРАН и ПО от поражения ЗУР ЛС ПВО.

Состав средств наземной ЛС ПВО:

- $X_5(t_0)$ — количество ЗУР (активные объекты), которые поражаются средствами ТРАН;
- X_{51} - канальность комплексов ЗРК «Пэтриот» средней дальности;
- X_{52} - канальность комплексов ЗРК «Пэтриот» большой дальности;
- $X_5(t_0) = X_{51}(t_0) + X_{52}(t_0)$ - общее количество ЗУР «Пэтриот» на БД и СД;
- $X_6(t_0)$ — количество комплексов РЭП (активно-пассивные объекты), причем РЭП влияет на вероятность поражения ТРАН ЛС ВВ и АО ЛС ПВО;

- $X_7(t_0)$ — количество многофункциональных радиолокационных станций (МФ РЛС) с фазированной решеткой, одна РЛС может сопровождать несколько воздушных целей;
- $X_8(t_0)$ — количество радиолокационных станций командного пункта (РЛС КП).

Вероятности поражения:

- P_{3i} - вероятность поражения объектами ТРАН объектов ЛС ПВО $i = 5, 6, 7, 8$;
- P_{6j} - вероятность поражения ЗУР «Пэтриот» средств ЛС ВБ $j = 1, 2, 3, 4$.

Процесс конфликтного взаимодействия разделен на два этапа, согласно достижению объектами ВБ пространственных положений, для которых наиболее целесообразно использование тех или иных видов ЗРК со стороны ЛС ПВО (т. к. ЗРК различаются по дальности действия): этапы дальнего и среднего взаимодействия. На каждом из этапов перед системой управления огнем встает задача распределения доступных средств поражения по наблюдаемым целям (объектам группировки воздушного базирования).

На рис. 2 представлена временная развертка многорубежной конфликтной ситуации.

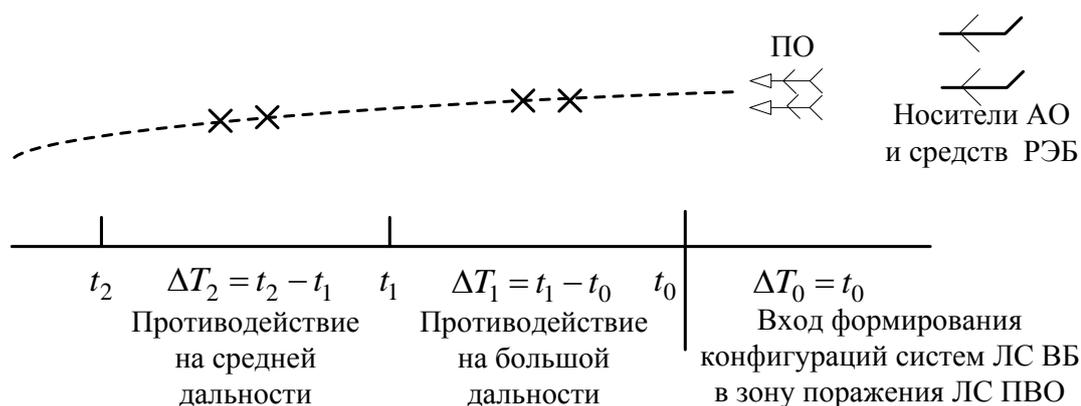


Рис. 2. Временная развертка многорубежной конфликтной ситуации

На рис. 2 изображены моменты времени, соответствующие следующим событиям:

- t_0 - момент вхождения воздушных целей в зону целераспределения комплексов большой дальности ЛС ПВО;

- t_1 - момент вхождения воздушных целей в зону целераспределения комплексов средней дальности ЛС ПВО;

- t_2 - момент встречи активных средств ЛС ВБ с наземной частью ЛС ПВО.

Основной задачей системы управления ресурсами ПВО является оптимальное распределение имеющихся средств обороны по воздушным целям. Оптимизация производится по критерию максимизации математического ожидания количества уничтоженных целей до момента встречи целей с объектом обороны.

Метод решения основной задачи управления ресурсами ПВО заключается в использовании алгоритмов оптимального прогноза динамики конфликта, который позволяет в каждый конкретный момент времени получить оптимальное распределение ресурсов ПВО, основанное на текущей информации о пространственной конфигурации ЛС ВБ. Алгоритм прогноза динамики конфликта позволяет получить значения критериев оптимизации на момент встречи целей с объектом обороны с учетом полученного на текущий момент распределения.

Прогноз динамики конфликта используется для корректировки распределения ресурсов только на границах этапов обороны — на рубежах обороны, причем для каждого конкретного рубежа используется своя динамическая модель, согласно технической возможности получения тех или иных данных о составе, численности СВБ:

- на дальнем рубеже обороны возможно получение информации о количестве и пространственной конфигурации СВБ, поэтому со стороны ПВО имеется возможность управлять распределением ресурсов ПВО и перехватом на большой дальности с целью подавления тактического преимущества со стороны СВБ;

- на среднем рубеже обороны имеется техническая возможность различения объектов группировки ВБ по типу (принципу устройства головки самонаведения) и использование комплексов РЭП, для снижения вероятности поражения, т.к. объекты, оснащенные активной системой наведения, представляют собой принципиально большую угрозу для тактических объектов и на их уничтожение необходимо выделение большего количества ресурсов ПВО.

На первом такте (на интервале ΔT_1) решаются задачи долевого распределения ресурса комплексов большой дальности ЗРК «Пэтриот» по активным и пассивным подгруппам ЛС ВБ, управления мощностью комплексов РЭБ ЛС ВБ, и перехвата целей ЗУР большой дальности.

На рис. 3 изображена структурная схема взаимодействия ЛС ПВО – ЛС ВБ на БД.

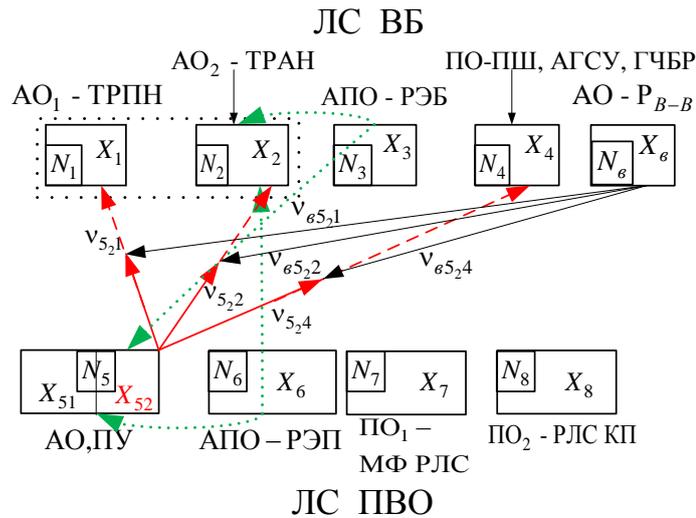


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия ЛС ПВО – ЛС ВБ на большой дальности
(Пунктиром указано позитивное и негативное влияние комплексов РЭП и РЭБ)

Общая математическая модель взаимодействия ЛС ПВО и ЛС ВБ на большой дальности (на интервале ΔT_1) описывается системой уравнений конфликта (динамики средних) следующего вида:

$$\begin{cases} X_1(t_1) = X_1(t_0) - P_{521} \cdot X_{521}(t_d); X_1(t_0) = N_1 \\ X_2(t_1) = X_2(t_0) - P_{522} \cdot X_{522}(t_d); X_2(t_0) = N_2 \\ X_4(t_1) = X_4(t_0) - P_{524} \cdot X_{524}(t_d); X_4(t_0) = N_4 \\ X_6(t_d) = 0; X_6(t_0) = N_6 \\ X_{52}(t_1) = 0; X_{52}(t_0) = N_{52} \\ X_{521}(t_d) = v_{521} \cdot X_{52}(t_0) - (P_{6521} \cdot v_{6521} \cdot X_6(t_0)); \\ X_{522}(t_d) = v_{522} \cdot X_{52}(t_0) - (P_{6522} \cdot v_{6522} \cdot X_6(t_0)); \\ X_{524}(t_d) = v_{524} \cdot X_{52}(t_0) - (P_{6524} \cdot v_{6524} \cdot X_6(t_0)). \end{cases} \quad (1)$$

где

- $t_d \in (t_0, t_1)$ – внутренний момент времени, когда произойдет взаимодействие ракет воздух-воздух x_6 , нацеленных на поражение ракет большой дальности АО ЛС ПВО;
- $X_{521}(t_d)$ – количество сохранившихся ракет ЗУР, выделенных для поражения ТРПН после перехвата (к моменту t_d) ракетами «воздух-воздух» ЛС ВБ;

- $X_{522}(t_d)$ – количество сохранившихся ракет ЗУР, выделенных для поражения ТРАН после перехвата (к моменту t_d) ракетами «воздух-воздух» ЛС ВБ;
- $X_{524}(t_d)$ – количество сохранившихся ракет ЗУР, выделенных для поражения ПО ЛС ВБ после перехвата (к моменту t_d) ракетами «воздух-воздух» ЛС ВБ.

В данной системе уравнений:

v_{ij} – доля активных средств i -го вида, выделенных для воздействия на объект j -го вида (управляющие функции в конфликте), причём:

$$v_{521} + v_{522} + v_{524} = 1; \quad v_{6521} + v_{6522} + v_{6524} = 1; \quad (2)$$

где

v_{521} – управляющий параметр, доля ракет X_{52} , выделенных на поражение ТРПН X_1 ;

v_{522} – управляющий параметр, доля ракет X_{52} , выделенных на поражение ТРАН X_2 ;

v_{524} – управляющий параметр, доля ракет X_{52} , выделенных на поражение ПБ X_4 ;

v_{6521} – управляющий параметр, доля ракет X_6 , выделенных на перехват от поражения ТРПН X_1 ;

v_{6522} – управляющий параметр, доля ракет X_6 , выделенных на перехват от поражения ТРАН X_2 ;

v_{6524} – управляющий параметр, доля ракет X_6 , выделенных на перехват от поражения ПБ X_4 ;

P_{ij} – эффективность воздействия на один объект j -го типа одного объекта i -го типа.

В данной работе рассматривается конфликтная ситуация взаимодействия ЛС ПВО с РЭП и ЛС ВБ с РЭБ. В конфликтной ситуации под действием РЭБ и РЭП вероятность поражения АО ЛС ПВО и ЛС ВБ изменяется. При этом вероятность поражения принимает общий вид:

- для ЛС ВБ:

$$P_{ij} = P_{ij_{\max}} \cdot e^{-\mu_i \cdot \lambda_{\text{РЭП}}} \cdot e^{-\mu_j \cdot \lambda_{\text{РЭБ}}}, \quad i = 2, \quad j = 5, 6, 7, 8. (\mu_i \neq \mu_j), \quad (3)$$

где

μ_i – коэффициент негативного влияния РЭП ЛС ПВО на ТРАН;

μ_j – коэффициент позитивного влияния РЭБ ЛС ВБ на ЗУР «Пэтриот»;

$\lambda^{РЭБ}$ – мощность комплекса РЭБ (нормированная);

$\lambda^{РЭП}$ – мощность комплекса РЭП (нормированная);

$P_{ij_{\max}}$ – максимальная вероятность поражения.

- для ЛС ПВО:

$$P_{ij} = P_{ij_{\max}} \cdot e^{-\mu_i \cdot \lambda^{РЭП}} \cdot e^{-\mu_j \cdot \lambda^{РЭБ}}, i = 5_2, j = 1, 2, 4. (\mu_i \neq \mu_j), \quad (4)$$

где

μ_i – коэффициент позитивного влияния РЭП ЛС ПВО на ТРАН;

μ_j – коэффициент негативного влияния РЭБ ЛС ВБ на ЗУР «Пэтриот».

Анализ слагаемых в скобках в правых частях уравнений и систем (1) - (4) показывает, что каждое слагаемое $\lambda_i P_{ij} v_{ij} X_i$ является произведением интенсивности воздействия на среднее число поражённых объектов j -го типа от воздействия $v_{ij} X_i$ объектов i -го типа. При учёте реальной конфигурации с вычислением матриц $\{P_{ij}^{\theta\psi}\}$ данные слагаемые принимают вид

$$e^{-\mu_i \cdot \lambda^{РЭП}} \cdot e^{-\mu_j \cdot \lambda^{РЭБ}} \cdot \sum_{\psi=1}^{X_j} \sum_{\theta=1}^{X_i} P_{ij}^{\theta\psi} \gamma_{ij}^{\theta\psi}, \quad (5)$$

где

$$\sum_{\psi=1}^{X_j} \sum_{\theta=1}^{X_i} \gamma_{ij}^{\theta\psi} = v_{ij} X_i \quad (6)$$

и $\{\gamma_{ij}^{\theta\psi}\}$ – матрица назначений, элементы которой при фиксированных i и j имеют смысл:

$$\gamma_{ij}^{\theta\psi} = \begin{cases} 1, & \text{если объект типа } j, \text{ находящийся в точке } \psi, \\ & \text{будет "обслужен" АО типа } i \text{ из точки } \theta; \\ 0, & \text{если этого не произойдёт.} \end{cases} \quad (7)$$

Теперь система (1) в форме комбинации декомпозированного ЦР и ПДК по аналогии с [1] принимает вид (8):

$$\left\{ \begin{array}{l}
X_1(t_1) = X_1(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_1(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{521}(t_d)} P_{521}^{\theta\psi} \gamma_{521}^{\theta\psi} \right); \\
X_2(t_1) = X_2(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_2(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{522}(t_d)} P_{522}^{\theta\psi} \gamma_{522}^{\theta\psi} \right); \\
X_4(t_1) = X_4(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_4(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{524}(t_d)} P_{524}^{\theta\psi} \gamma_{524}^{\theta\psi} \right); \\
X_{521}(t_d) = v_{521} \cdot X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{521}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_e(t_0)} P_{e521}^{\theta\psi} \gamma_{e521}^{\theta\psi} \right); \\
X_{522}(t_d) = v_{522} \cdot X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{522}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_e(t_0)} P_{e522}^{\theta\psi} \gamma_{e522}^{\theta\psi} \right); \\
X_{524}(t_d) = v_{524} \cdot X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{524}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_e(t_0)} P_{e524}^{\theta\psi} \gamma_{e524}^{\theta\psi} \right); \\
X_{52}(t_d) = X_{521}(t_d) + X_{522}(t_d) + X_{524}(t_d); \\
\sum_{\psi=1}^{X_1(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{521}(t_d)} \gamma_{521}^{\theta\psi} = X_{521}(t_d); \quad \sum_{\psi=1}^{X_2(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{522}(t_d)} \gamma_{522}^{\theta\psi} = X_{522}(t_d); \\
\sum_{\psi=1}^{X_4(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{524}(t_d)} \gamma_{524}^{\theta\psi} = X_{524}(t_d); \quad \sum_{\psi=1}^{X_{521}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_e(t_0)} \gamma_{e521}^{\theta\psi} = v_{e521} \cdot X_e(t_0); \\
\sum_{\psi=1}^{X_{522}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_e(t_0)} \gamma_{e522}^{\theta\psi} = v_{e522} \cdot X_e(t_0); \quad \sum_{\psi=1}^{X_{524}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_e(t_0)} \gamma_{e524}^{\theta\psi} = v_{e524} \cdot X_e(t_0).
\end{array} \right. \quad (8)$$

В качестве показателя потерь (J) в ОПДК берём показатель, имеющий смысл суммарного перевеса противника по активным и пассивным средствам и контроля скорости убывания его активных средств:

$$\left. \begin{array}{l}
J_{BB} = J_1 = \alpha_1 \left[X_{52}^2(t_d) - (X_1^2(t_1) + X_2^2(t_1)) \right] + \rightarrow \text{min перевеса ракет БД, выделенных} \\
\hspace{15em} \text{на поражение ТРАН и ТРПН;} \\
+\alpha_2 \left[X_{52}^2(t_d) \right] + \hspace{15em} \rightarrow \text{min числа ракет БД;} \\
+\alpha_3 \left[v_{524}^2 X_{52}^2(t_d) - X_4^2(t_1) \right]; \hspace{15em} \rightarrow \text{min перевеса числа ракет выделенных} \\
\hspace{15em} \text{на поражение ПБ;} \\
J_{ПВО} = J_2 = \beta_1 \left[(X_1^2(t_1) + X_2^2(t_1)) - X_{52}^2(t_d) \right] + \rightarrow \text{min перевеса ракет ТРПН и ТРАН;} \\
+\beta_2 \left[X_4^2(t_1) \right] + \hspace{15em} \rightarrow \text{min числа ПО;} \\
+\beta_3 \left[X_1^2(t_1) + X_2^2(t_1) \right]. \hspace{15em} \rightarrow \text{min числа попадающих на среднюю} \\
\hspace{15em} \text{дальность;}
\end{array} \right\} \quad (9)$$

Из (9) следует:

$$J_1 \Rightarrow \text{min}; J_2 \Rightarrow \text{min}.$$

На втором такте (на интервале ΔT_2) решаются задачи долевого распределения ресурсов комплексов средней дальности по объектам системы ВБ с применением оптимального числа ракет средней дальности по объектам ВБ, управления мощностью комплексов РЭП ЛС ПВО, перехвата целей ЗУР средней дальности, и нанесения ущерба наземным системам ЛС ПВО.

На рис. 4 представлена структурная схема взаимодействия ЛС ПВО – ЛС ВБ на СД.

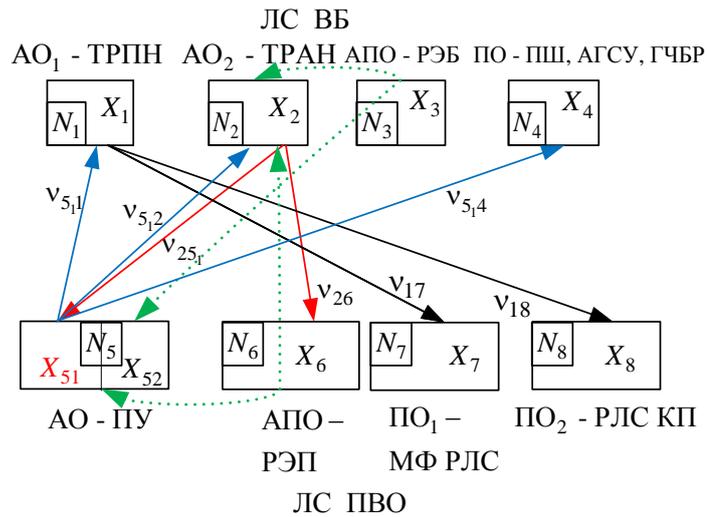


Рис. 4. Структурная схема взаимодействия ЛС ПВО – ЛС ВБ на средней дальности

Общая математическая модель взаимодействия ЛС ПВО и ЛС ВБ на средней дальности (на интервале ΔT_2) описывается системой уравнений динамики конфликта следующего вида:

$$\begin{cases} X_1(t_2) = X_1(t_1) - P_{511} \cdot v_{511}(t_1) \cdot X_{51}(t_1); \\ X_2(t_2) = X_2(t_1) - P_{512} \cdot v_{512}(t_1) \cdot X_{51}(t_1); \\ X_4(t_2) = X_4(t_1) - P_{514} \cdot v_{514}(t_1) \cdot X_{51}(t_1); \\ X_3(t_2) = X_3(t_1); \\ X_{51}(t_2) = 0; \\ X_{\text{ПУ}}(t_2) = X_{\text{ПУ}}(t_1) - P_{2\text{ПУ}} \cdot v_{2\text{ПУ}}(t_1) \cdot X_2(t_2); \\ X_6(t_2) = X_6(t_1) - P_{26} \cdot v_{26}(t_1) \cdot X_2(t_2); \\ X_7(t_2) = X_7(t_1) - P_{17} \cdot v_{17}(t_1) \cdot X_1(t_2); \\ X_8(t_2) = X_8(t_1) - P_{18} \cdot v_{18}(t_1) \cdot X_1(t_2). \end{cases} \quad (10)$$

В данной системе уравнений:

v_{ij} – доля активных средств i -го вида, выделенных для воздействия на объект j -го вида (управляющие функции в конфликте), причём:

$$\begin{aligned} v_{2\text{ПУ}} + v_{26} &= 1; v_{17} + v_{18} = 1; \\ v_{511} + v_{512} + v_{514} &= 1. \end{aligned} \quad (11)$$

где

v_{17} – управляющий параметр, доля ракет ТРПН, выделенных на поражение группы МФ РЛС $X_7(t_1)$;

v_{18} – управляющий параметр, доля ракет ТРПН, выделенных на поражение РЛС КП

$X_8(t_1)$;

v_{26} – управляющий параметр, доля ракет ТРАН, выделенных на поражение РЭП ЛС ПВО;

$v_{2\Pi\Pi}$ – управляющий параметр, доля ракет ТРАН, выделенных на поражение пусковых установок (ПУ) ЛС ПВО;

v_{511} – управляющий параметр, доля ракет X_{51} , выделенных на поражение ТРПН ЛС ВБ;

v_{512} – управляющий параметр, доля ракет X_{51} , выделенных на поражение ТРАН ЛС ВБ;

v_{514} – управляющий параметр, доля ракет X_{51} , выделенных на поражение ПБ ЛС ВБ.

Система (10) по аналогии с (8) принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1(t_2) = X_1(t_1) - \sum_{\psi=1}^{X_1(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} P_{511}^{\theta\psi} \gamma_{511}^{\theta\psi}; \\ X_2(t_2) = X_2(t_1) - \sum_{\psi=1}^{X_2(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} P_{512}^{\theta\psi} \gamma_{512}^{\theta\psi}; \\ X_4(t_2) = X_4(t_1) - \sum_{\psi=1}^{X_2(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} P_{514}^{\theta\psi} \gamma_{514}^{\theta\psi}; \\ X_3(t_2) = X_3(t_1); \\ X_{51}(t_2) = 0; \\ X_{\Pi\Pi}(t_2) = X_{\Pi\Pi}(t_1) - \sum_{\psi=1}^{X_{\Pi\Pi}(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_2(t_2)} P_{2\Pi\Pi}^{\theta\psi} \gamma_{2\Pi\Pi}^{\theta\psi}; \\ X_6(t_2) = X_6(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_6(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_2(t_2)} P_{26}^{\theta\psi} \gamma_{26}^{\theta\psi} \right); \\ X_7(t_2) = X_7(t_1) - \sum_{\psi=1}^{X_7(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_1(t_2)} P_{17}^{\theta\psi} \gamma_{17}^{\theta\psi}; \\ X_8(t_2) = X_8(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_8(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_1(t_2)} P_{18}^{\theta\psi} \gamma_{18}^{\theta\psi} \right); \\ \sum_{\psi=1}^{X_1(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} \gamma_{511}^{\theta\psi} = v_{511} \cdot X_{51}(t_1), \quad \sum_{\psi=1}^{X_2(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} \gamma_{512}^{\theta\psi} = v_{512} \cdot X_{51}(t_1); \\ \sum_{\psi=1}^{X_4(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} \gamma_{514}^{\theta\psi} = v_{514} \cdot X_{51}(t_1); \\ \sum_{\psi=1}^{X_{\Pi\Pi}(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_2(t_1)} \gamma_{2\Pi\Pi}^{\theta\psi} = v_{2\Pi\Pi} \cdot X_2(t_1); \quad \sum_{\psi=1}^{X_6(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_2(t_1)} \gamma_{26}^{\theta\psi} = v_{26} \cdot X_2(t_1); \\ \sum_{\psi=1}^{X_7(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_1(t_1)} \gamma_{17}^{\theta\psi} = v_{17} \cdot X_1(t_1); \quad \sum_{\psi=1}^{X_8} \sum_{\theta=1}^{X_1} \gamma_{18}^{\theta\psi} = v_{18} \cdot X_1(t_1); \\ v_{2\Pi\Pi} + v_{26} = 1; \quad v_{17} + v_{18} = 1. \end{array} \right. \quad (12)$$

Функционалы качества в ОПДК для каждой системы имеют смысл минимизации перевеса по числу активных и пассивных объектов на момент окончания такта (тактов) взаимодействия (терминальные показатели):

$$\left. \begin{aligned}
 J_{\text{ВБ}} = J_1 = \alpha_1 \left[\left(X_7^2(t_2) + X_8^2(t_2) \right) - X_1^2(t_2) \right] + & \rightarrow \text{min терминальные перевеса} \\
 & \text{РЛС КП и МФ РЛС} \\
 + \alpha_2 \left[\left(X_6^2(t_2) + X_{\text{ПУ}}^2(t_2) \right) - X_2^2(t_2) \right] + & \rightarrow \text{min терминальные перевеса} \\
 & \text{РЭП и ПУ} \\
 + \alpha_3 \left[X_{\text{ПУ}}^2(t_2) \right]; & \rightarrow \text{min ПУ} \\
 J_{\text{ПВО}} = J_2 = \beta_1 \left[X_1^2(t_2) - \left(X_7^2(t_2) + X_8^2(t_2) \right) \right] + & \rightarrow \text{min терминальные перевеса} \\
 & \text{ракет ТРПН} \\
 + \beta_2 \left[X_2^2(t_2) - \left(X_6^2(t_2) + X_{\text{ПУ}}^2(t_2) \right) \right] + & \rightarrow \text{min терминальные перевеса} \\
 & \text{ракет ТРАН} \\
 + \beta_3 \left[X_1^2(t_2) + X_2^2(t_2) \right]. & \rightarrow \text{min активных объектов ЛС ВБ}
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Из (13) следует:

$$J_A \Rightarrow \min; J_B \Rightarrow \min.$$

Приведенные показатели являются базовыми, и возможно расширение основных показателей, в частности — дополнительный учет математического ожидания количества и доли ПУ, получивших j -ую степень повреждения, математического ожидания оценки нанесенного ущерба ЗРК по j -й степени повреждения с учетом ранга комплексов и др.

Повышение эффективности многорубежного динамического распределения ресурсов системы ЗРК «Пэтриот» требует разработки оптимальных комбинированных методов целераспределения, ранжирования целей по опасности с учетом в математической модели конфликтного противодействия их динамического обновления, комбинирования ЦР и ОПДК, комбинированного применения огневых средств и комплексов радиоэлектронного противодействия, радиоэлектронной борьбы. Исследуются способы повышения качества информационных средств и перехвата целей, многокритериальный и потенциальный ущерб ПВО и СВН, логика выбора целей, тактика разлета из «импульсного объема» в группировках управляемых снарядов противника (ГУСП) СВН, тактика самолетов-носителей, средств РЭБ-РЭП, типов УСП в СВН и многих других факторов.

Моделирование проводилось на основе программной системы многокритериальной оптимизации многообъектных динамических систем («МОМДИС») в среде MATLAB и на C++. На основе данных моделирования проведен многофакторный анализ прогноза динамики конфликта на модели ЗРК «Пэтриот». Аналитически решена задача синтеза системы управления многотактовым прогнозом на основе асимптотики многопрограммного управления.

Пример моделирования. Большая дальность (1-ый рубеж обороны ЛС ПВО)

Начальные численности: $X_1=14, X_2=14, X_4=14, X_{52}=32, X_B=12$.

Весовые коэффициенты (приоритеты систем):

$a_1=0,25; a_2=0,25; a_3=0,45; a_4=0,05$ – ЛС ВБ;

$\beta_1=0,35; \beta_2=0,35; \beta_3=0,25; \beta_4=0,05$ – ЛС ПВО.

Эффективности воздействия объектов i -го типа на объекты j -го типа:

$P_{521}=0,5; P_{522}=0,5; P_{524}=0,5; P_{B521}=0,5; P_{B522}=0,5; P_{B524}=0,5$.

На большой дальности тактика ЛС ВБ заключается в создании коридора для пассивных объектов и сохранении ТРПН и ТРАН, которым в свою очередь необходимо провести ПО ЛС ВБ (штурмовики, авиабомбы, баллистические головки и др.) через дальний рубеж обороны, поэтому выбраны следующие приоритеты систем.

ЛС ПВО старается не допустить формирование коридора и уничтожить пассивные средства, поэтому осуществляется практически одинаковое распределение весовых коэффициентов в тактических показателях.

Базовый вариант содержит признаки насыщенного налета ($64>32$).

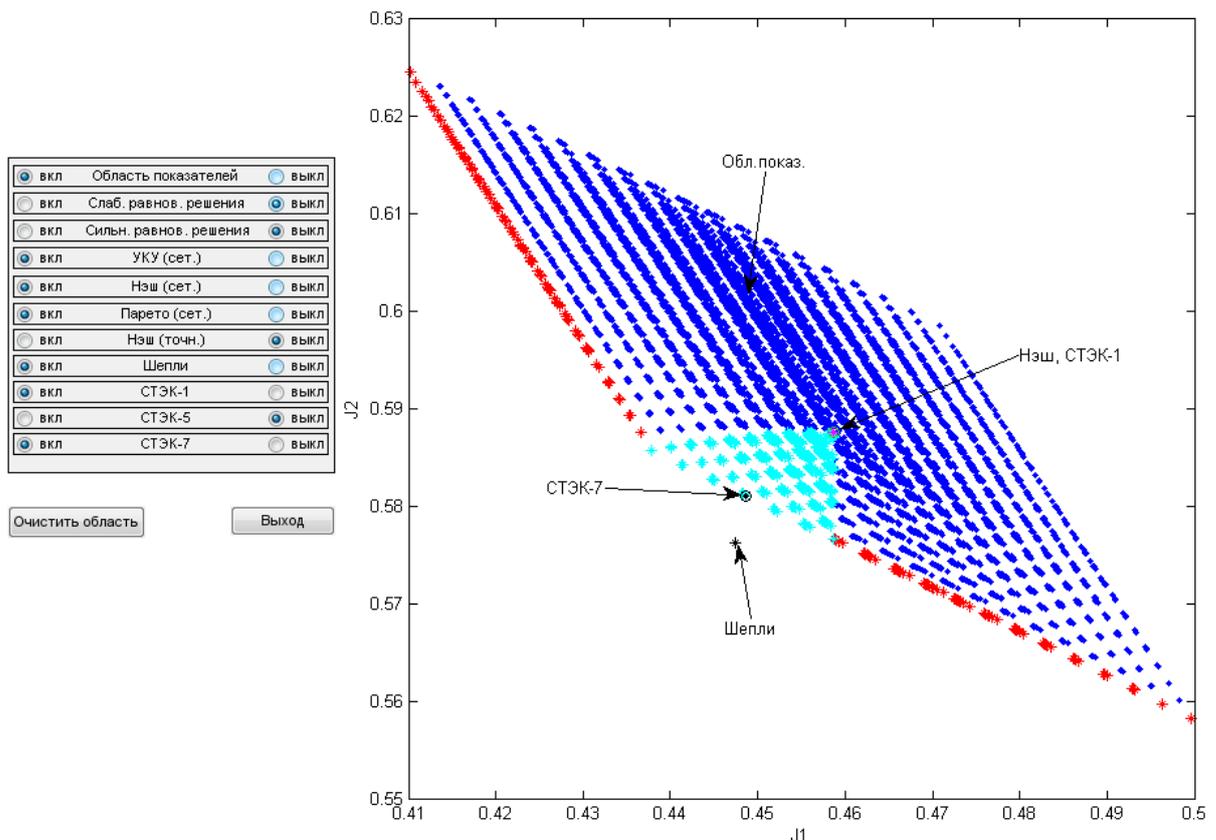


Рис. 5. Область нормированных показателей

Результаты моделирования

	Численности					Доли X_B			Доли X_{S2}			Показатели		Сумма
	X_1	X_2	X_4	X_{S2}	X_B	v_{B521}	v_{B522}	v_{B524}	v_{S21}	v_{S22}	v_{S24}	J_{BB}	$J_{ПВО}$	J_{BB+}
Нач.	14	14	14	32	12	$x_B \rightarrow X_{S21}$	$x_B \rightarrow X_{S22}$	$x_B \rightarrow X_{S24}$	$x_{S2} \rightarrow X_1$	$x_{S2} \rightarrow X_2$	$x_{S2} \rightarrow X_4$			$J_{ПВО}$
СТЭК-1 (t_k)	9,51	9,17	10,31	26 t_d	0	0,16	0,37	0,46	0,31	0,37	0,31	0,45	0,58	1,04
СТЭК-7 (t_k)	9,47	8,86	10,65	26 t_d	0	0,32	0,26	0,40	0,34	0,37	0,28	0,52	0,47	0,99

По результатам моделирования для базового варианта следует, что ЛС ПВО практически равномерно распределяет доли активных средств между ТРПН, ТРАН и ПО (0,34; 0,37; 0,28). Большая доля выделена на поражения ТРАН, т.к. данные объекты имеют большие габариты и ЭПР. ЛС ПВО большую долю своих ракет выделяет на защиту ПО (0,46). Доли полученные в СТЭК-7 ставят ЛС ПВО в более выгодное положение при взаимодействии на большой дальности, за счет чего удается минимизировать показатель потерь для ЛС ПВО.

Рассчитаны матрицы ЦР для АО ЗРК «Пэтриот» при насыщенном налете. Строки соответствуют номерам активных средств, воздействующих на объекты, принадлежащие коалиции противника. Номера объектов, подвергающихся этому воздействию, соответствуют столбцам матриц. Если на пересечении строки и столбца стоит единица, то такое взаимодействие имеет место, если нет – будет стоять нуль.

Матрицы целераспределения $\{\gamma_{ij}^{\theta\Psi}\}$:

$$\{AO_{521}\}: \gamma_{521}^{4,1} = \gamma_{521}^{31,2} = \gamma_{521}^{25,3} = \gamma_{521}^{19,5} = \gamma_{521}^{10,6} = \gamma_{521}^{22,7} = \gamma_{521}^{28,9} = \gamma_{521}^{16,10} = \gamma_{521}^{7,12} = \gamma_{521}^{13,13} = \gamma_{521}^{1,14} = 1;$$

$$\{AO_{522}\}: \gamma_{522}^{26,16} = \gamma_{522}^{32,18} = \gamma_{522}^{2,19} = \gamma_{522}^{23,20} = \gamma_{522}^{8,21} = \gamma_{522}^{20,22} = \gamma_{522}^{5,23} = \gamma_{522}^{29,24} = \gamma_{522}^{14,26} = \gamma_{522}^{11,27} = \gamma_{522}^{17,28} = 1;$$

$$\{AO_{524}\}: \gamma_{524}^{27,29} = \gamma_{524}^{24,31} = \gamma_{524}^{30,32} = \gamma_{524}^{6,35} = \gamma_{524}^{3,36} = \gamma_{524}^{18,37} = \gamma_{524}^{12,38} = \gamma_{524}^{15,40} = \gamma_{524}^{21,41} = \gamma_{524}^{9,42} = 1.$$

Пример моделирования. Средняя дальность (2-ой рубеж обороны)

Начальные численности: $X=[10\ 9\ 10\ 2\ 24\ 2\ 2\ 2\ 4]$

В базовый вариант на средней дальности переходят численности объектов ЛС ВБ с большой дальности (10 – ТРПН, 9 – ТРАН, 10 – ПО), которые обслуживают ракеты средней дальности ЛС ПВО (24).

Весовые коэффициенты (тактические приоритеты):

$a_1=0,3; a_2=0,3; a_3=0,35; a_4=0,05$ - ЛС ВБ;

$\beta_1=0,25; \beta_2=0,25; \beta_3=0,45; \beta_4=0,05$ – ЛС ПВО.

Тактика ЛС ВБ заключается в равномерном поражении объектов ЛС ПВО с небольшим смещением в сторону РЛС. ЛС ПВО большую долю ракет выделяет на поражения ПО ($\beta_3+ \beta_4=0,5$), т.к. они наносят максимальный урон стратегически важным объектам.

Эффективности воздействия объектов i -го типа на объекты j -го типа

$P_{17}=0,5; P_{18}=0,5; P_{26}=0,5; P_{25}=0,5; P_{511}=0,75; P_{512}=0,75.$

Таблица 2

Результаты моделирования

	Численности							ВБ				ПВО			J1	J2
	X1	X2	X4	X51	X6	X7	X8	v17	v18	v25	v26	v511	v512	v514		
Нач.	10	9	10	6	2	2	2									
СТЭК-1	1,61	1,00	0,00	2,40	2,00	0,00	0,63	0,50	0,50	0,25	0,75	0,25	0,25	0,50	0,55	0,89
СТЭК-7	3,25	0,00	0,00	4,00	2,00	1,50	1,50	0,50	0,50	0,75	0,25	0,17	0,20	0,63	-1,15	1,98

Из результатов моделирования на средней дальности видно, что ЛС ПВО выполнило основную тактическую задачу и поразила все пассивные объекты ЛС ВБ ($X_4=0$). Были уничтожены все ТРПН. Уцелевшие ТРАН нанесли незначительный урон ЛС ПВО, после которого система может продолжать боевые действия.

Матрицы целераспределения $\{\gamma_{ij}^{\theta\Psi}\}$:

$$\{P_{511}\}: \gamma_{511}^{18,2} = \gamma_{511}^{12,3} = \gamma_{511}^{21,4} = \gamma_{511}^{6,5} = \gamma_{511}^{9,7} = \gamma_{511}^{24,8} = \gamma_{511}^{15,9} = \gamma_{511}^{3,10} = \gamma_{511}^{25,11} = \gamma_{511}^{1,13} = 1;$$

$$\{P_{512}\}: \gamma_{512}^{22,15} = \gamma_{512}^{13,16} = \gamma_{512}^{26,17} = \gamma_{512}^{19,18} = \gamma_{512}^{10,20} = \gamma_{512}^{7,22} = \gamma_{512}^{16,24} = \gamma_{512}^{27,25} = \gamma_{512}^{4,28} = 1;$$

$$\{P_{514}\}: \gamma_{514}^{14,29} = \gamma_{514}^{28,30} = \gamma_{514}^{11,31} = \gamma_{514}^{17,32} = \gamma_{514}^{20,33} = \gamma_{514}^{23,34} = \gamma_{514}^{5,37} = \gamma_{514}^{29,39} = \gamma_{514}^{2,40} = \gamma_{514}^{8,41} = 1.$$

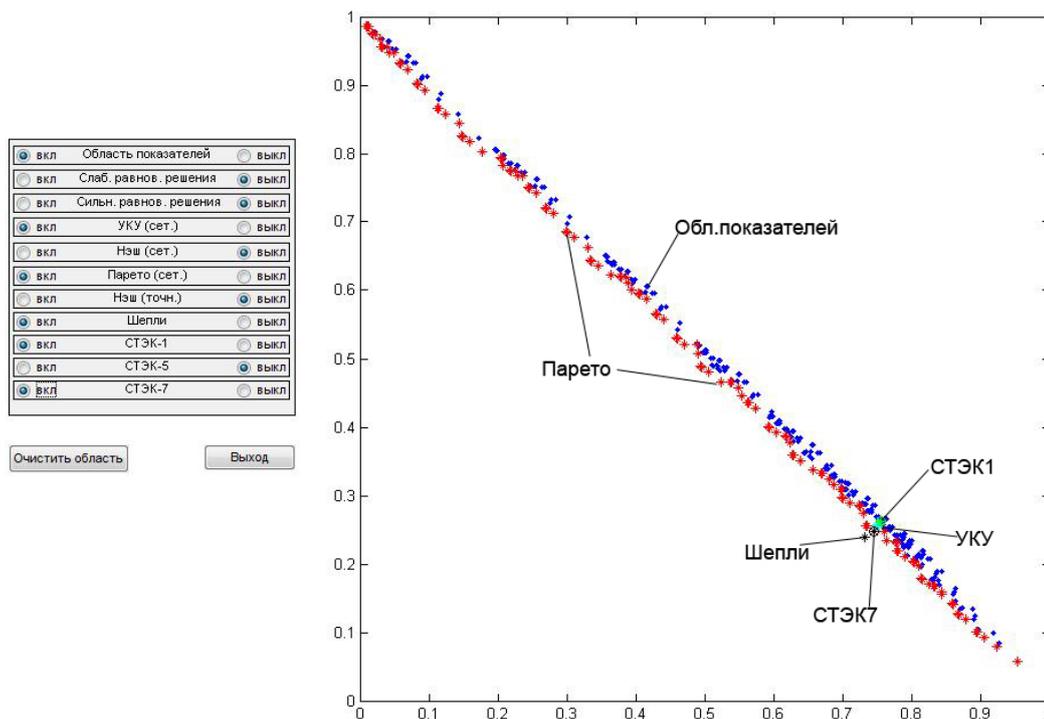


Рис. 6. Область нормированных показателей

Из результатов моделирования видно, что обе группировки следуют тактике взаимодействия.

Для усиления обороноспособности ЛС ПВО, необходима точная оценка числа ракет активного и пассивного типа, для выделения определенной мощности РЭП на подавление активных средств и большего числа ракет на пассивные средства, что сильно отразится на значении показателя эффективности ЛС ПВО. При увеличении вероятности поражения объектами АО ЗРК «Пэтриот», имеет место не значительный прирост эффективности.

Из конечных результатов, больше всего на исход конфликтного взаимодействия будет влиять соотношение численности объектов конфликтных группировок. При сопоставимом числе объектов ЛС ПВО и ЛС ВБ, на эффективность взаимодействия влияют вероятностные характеристики и количество ПО ЛС ВБ, т.к. их действие происходит в временном опозданием и на их численность можно повлиять только на первом этапе взаимодействия.

Заключение

Описанные эксперименты, соответствующие модели конфликтной ситуации ЛС ВБ и ЛС ПВО с ЗРК «Пэтриот» позволяют сделать следующие выводы:

- при формировании базового варианта можно более точно установить либо факт симметрии потенциальных возможностей систем, либо преимущество одной из них;
- формируется метод динамического проектирования конфликтующих конфигураций, который позволяет выбрать рациональные количественные характеристики систем, в частности, по повышению живучести многофункциональной РЛС полуактивного наведения, по обеспечению требуемой эффективности, коррекции структуры и т.д.
- набор управляющих параметров, принятый в модели можно считать исчерпывающим, т.к. влияние тактических приоритетов на окончательный результат незначительно;
- достаточно высокие начальные вероятности поражения со стороны ПВО могут быть скомпенсированы только повышенными численностями со стороны группировки ВБ;
- высокая дискретизация управляющих параметров не позволяет повысить точность результатов. Пятикратная дискретизация по огневым и информационным управляющим параметрам позволяет достигнуть исчерпывающей точности расчетов;
- объемы ресурсов со стороны группировки ВБ и ПВО играют решающую роль при расчете данной модели.

В целом, поставлена цель работы, сформирована математическая модель противодействия ЛС ПВО – ЛС ВБ на основе батареи ЗРК «Пэтриот», выполнен многофакторный анализа результатов моделирования.

Список использованных источников

1. Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 576 с.
2. Методы оптимизации систем автоматического управления // Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник для вузов. В 5 т. Т. 4. Теория оптимизации систем автоматического управления / ред. Пупков К. А., Егупов Н. Д. - 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - С. 365-514.

3. Островерхов И.Н., Чабанов В.А., Мухаметжанова А.О. Современные зенитные и противоракетные комплексы и их применение в составе систем ПВО/ПРО // Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников.-М.: ГосНИИАС (Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем), 2011. - № 2.- С. 1-172.
4. Воронов Е.М., Репкин А.Л., Чжан Сяньцзянь Модифицированные стабильно-эффективные компромиссы на основе активных игровых равновесий в задачах конфликтно-оптимального управления // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Приборостроение.- 2011.- № 3(84). - С. 51-64.
5. Воронов Е. М., Карпунин А. А., Чжан Сяньцзянь, Ахметгаряев Н. Г. Повышение быстродействия задачи конфликтно-оптимального целераспределения малых групп летательных аппаратов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. - 2011. - № 8.- Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/213588.html> (дата обращения 05.10.2012).

Predictor method for conflict-optimal interaction of multiborder air-defense identification system and air-based system on the basis of the model "Patriot"

10, October 2012

DOI: 10.7463/1012.0466556

Chjan Syan'czyan'

Russia, Bauman Moscow State Technical University

ruszxj@gmail.com

The author forms and studies a complex algorithm of interaction between a ground defense system and air forces aircraft, combining task allocation systems for both systems and dynamics of the forecast results. The author solves the problem of synthesis of a control system for multirate forecast on the basis of asymptotic behavior of multi-program control.

Publications with keywords:[resources distribution](#), [prediction of the conflict dynamics](#), [the conflict-optimal interaction](#), [the method of decision-making](#), [combined target distribution](#), [systems configuration](#), [electronic warfare \(EW\)](#)

Publications with words:[resources distribution](#), [prediction of the conflict dynamics](#), [the conflict-optimal interaction](#), [the method of decision-making](#), [combined target distribution](#), [systems configuration](#), [electronic warfare \(EW\)](#)

References

1. Voronov E.M. *Metody optimizatsii upravleniia mnogoob'ektnymi mnogokriterial'nymi sistemami na osnove stabil'no-effektivnykh kompromissov* [Methods of optimization of management of multi-object multicriteria systems on the basis of stable-effective compromises]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 576 p.
2. Pupkov K. A., Egupov N. D., eds. *Metody optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Methods of optimization of the systems of automatic control]. In book: *Metody klassicheskoi i*

sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia : uchebnik dlia vuzov. V 5 t. T. 4. Teoriia optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniia [Methods of classical and modern theory of automatic control. In 5 vols. Vol. 4. The theory of optimization of the systems of automatic control]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004, pp. 365-514.

3. Ostroverkhov I.N., Chabanov V.A., Mukhametzhanova A.O. Sovremennye zenitnye i protivoraketnye komplekсы i ikh primeneniie v sostave sistem PVO/PRO [Modern anti-aircraft and anti-missile complexes and their application in the air defense systems / missile defense system]. *Analiticheskii obzor po materialam zarubezhnykh informatsionnykh istochnikov* [Analytical review of the materials of foreign information sources]. Moscow, GosNIIAS Publ., 2011, no. 2, pp. 1-172.

4. Voronov E.M., Repkin A.L., Chzhan Sian'tszian' Modifitsirovannye stabil'no-effektivnye kompromissy na osnove aktivnykh igrovykh ravnovesii v zadachakh konfliktno-optimal'nogo upravleniia [Modified stably-efficient trade-offs based on active game equilibriums in problems of conflict-optimal control]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2011, no. 3(84), pp. 51-64.

5. Voronov E. M., Karpunin A. A., Chzhan Sian'tszian', Akhmetgariaev N. G. Povyshenie bystrodeistviia zadachi konfliktno-optimal'nogo tseleraspredeleniia malykh grupp letatel'nykh apparatov [Rising of operating speed for the problem of conflict-optimum target setting of small groups of aircrafts]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 8. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/213588.html> , accessed 05.10.2012.