

Управление ресурсами многообъектных систем летательных аппаратов наземного и воздушного базирования в многорубежной конфликтной ситуации

© Е.М. Воронов, А.Л. Репкин, Чжан Сяньцзянь

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Анализируются проблемы управления ресурсами и принятия решений в задачах конфликтного взаимодействия сложных многообъектных систем летательных аппаратов наземного и воздушного базирования. Рассматривается комбинированная структура управления ресурсами систем, включающая их конфигурации, элементы целераспределения и ранжирования объектов систем, а также прогноз динамики средних численностей групп объектов систем. Формируется схема и математическая модель многорубежной конфликтной ситуации с учетом множества конфигурационных параметров систем. Реализуется метод конфликтно-оптимального управления ресурсами систем, на основе которого проводится многофакторный анализ эффективности влияния параметров конфликта на оптимальное управление ресурсами систем с возможностью получения позиционного прогноза управления.

Ключевые слова: управление ресурсами, многообъектные системы летательных аппаратов наземного и воздушного базирования, целераспределение, ранжирование объектов, многорубежная конфликтная ситуация, конфликтно-оптимальный прогноз, позиционный прогноз, стабильно-эффективный компромисс, эффективность конфликтного взаимодействия.

В многообразии современных проблем управления одной из важных является проблема управления сложными системами в условиях возрастающей структурно-целевой сложности задач управления и моделей прикладных систем. Она возникает и в задачах повышения эффективности многообъектных систем летательных аппаратов (МСЛА) при их групповом применении. При этом одной из основных задач, требующих постоянного системного совершенствования, является задача управления ресурсами многообъектной системы летательных аппаратов наземного базирования (МСНБ) в условиях активного конфликта с многообъектной системой летательных аппаратов воздушного базирования (МСВБ), имеющей симметричную систему управления ресурсами (СУР). Особенно важны вопросы системной организации и управления ресурсами в условиях конфликтного взаимодействия, так как они позволяют сосредоточить сложную структуру многообъектного и многокритериального исследования и проектирования в окрестности конфликтно-оптимальных межсистемно устойчивых (стабильных) решений, которые достигаются при комбинации методов теории оптимального управления, теории игр, исследования операций и принятия решений [2].

Одной из основных задач подсистемы принятия решения и управления МСЛА является целераспределение (ЦР), и для повышения эффективности СУР необходимо развивать и комбинировать ЦР с другими подзадачами, в частности, с ранжированием целей (РЦ) противодействующей МСЛА по опасности. Современные технические задачи совершенствования СУР решаются в направлениях [4]:

– методов решения многокритериальных комбинированных задач РЦ—ЦР с учетом эффективности, временных факторов, опасности цели и др.;

– учета влияния текущих конфигураций систем (КС);

– развития и применения принципов конфликтного взаимодействия для формирования прогноза динамики конфликта (ПДК).

В качестве базовой прикладной модели в работе рассмотрена локальная тактическая модель МСЛА в конфликтной ситуации «МСНБ — МСВБ» [6]. Прикладное применение ориентировано на типовые модели конфликтной ситуации, где в качестве МСНБ выступает наземный дивизион зенитно-управляемых ракет (ДЗУР) на базе американского ЗРС большой дальности «Пэтриот» или китайского ЗРС большой дальности «Красный флаг-18 — HQ-18», а также американского ЗРС средней дальности «Ус.Хок» или звена ЗРС малой дальности «Тор М-1». В качестве МСВБ рассмотрена авиационно-ракетная группировка (АРГ) в составе носителей ракет, самолетов-носителей комплексов управления и средств РЭБ, ракет разных классов с активным и пассивным наведением и др.

Общая схема комбинирования алгоритмов распределения ресурсов [1], на базе которой формируется структура совместного алгоритма КС—РЦ—ЦР—ОПДК, приведена на рис. 1.

На данной схеме показаны основные управляющие параметры конфликтной ситуации для алгоритма распределения ресурсов $\{\gamma_{ij}\}$ и алгоритма оптимизации прогноза динамики конфликта $\{v_{ij}\}$, которые образуют совместный алгоритм КС—РЦ—ЦР—ОПДК по управлению ресурсами систем. На начальном этапе формируются конфигурации систем, которые в качестве обобщенных начальных данных конфликта передаются в алгоритм распределения ресурсов. Начальное приближение управления на основе РЦ—ЦР служит исходной точкой для оптимизации показателей качества на основе математической модели ОПДК, в которой имеет место совмещение непрерывной (оптимизация показателей качества ОПДК) и дискретной (формирование вариантов РЦ—ЦР) задач оптимизации, что предъявляет жесткие требования для применяемых методов оптимизации. Оптимальное управление ОПДК $\{v_{ij}\}^{\text{opt}}$, найденное при решении итеративной задачи КС—РЦ—ЦР—ОПДК, передается в процедуру РЦ—ЦР, которая и формирует оптимальное управление ресурсами в форме

назначения активных объектов каждой систем на объекты противодействующей МСЛА.

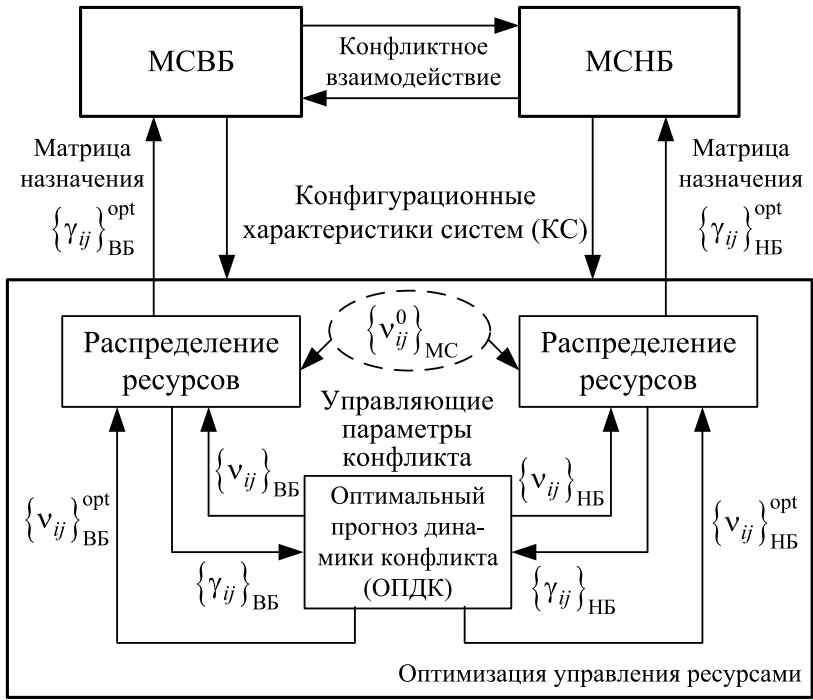


Рис. 1. Общая схема совместного алгоритма оптимизации управления ресурсами

Взаимодействие МСНБ с МСВБ может происходить на различных рубежах по дальности — это зависит от выбора такта взаимодействия, на котором вступают в действие ЗРС определенного типа. Следовательно, необходимо формировать несколько тактов-рубежей взаимодействия, последовательность которых может служить альтернативой его непрерывному варианту.

Конфликтное взаимодействие МСНБ (на примере ЗРС «Пэтриот») и МСВБ в основном формируется на двух рубежах — взаимодействие на большой дальности (БД) и на средней дальности (СД), при этом для каждого рубежа формируются собственные показатели эффективности [4]. В математической модели в общем виде отражено также влияние комплексов радиоэлектронной борьбы (РЭБ) МСВБ и радиоэлектронного противодействия (РЭП) МСНБ.

На рис. 2 представлена временная развертка многорубежной конфликтной ситуации «МСВБ — МСНБ», где показаны моменты времени, соответствующие следующим событиям: t_0 — момент вхождения воздушных целей в зону ЦР комплексов большой дальности

сти МСНБ; t_1 — момент вхождения воздушных целей в зону ЦР комплексов средней дальности МСНБ; t_2 — момент встречи активных объектов (АО) МСВБ с МСНБ.

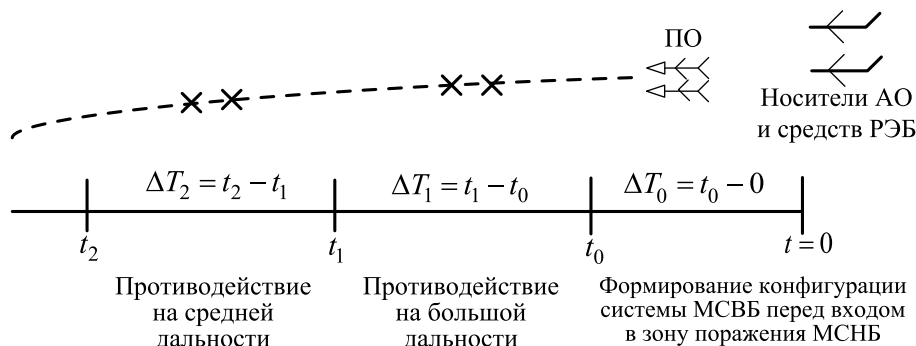


Рис. 2. Временная развертка многорубежной конфликтной ситуации

Разработанная схема конфликтного взаимодействия МСНБ и МСВБ изображена на рис. 3, где x_i — количество объектов каждого типа; v_{ij} — доля i -х средств, выделенных на поражение объектов j -го типа (управляющие параметры) с номинальной вероятностью поражения p_{ij} . Основная цель МСНБ — не пропустить пассивные объекты (ПО) МСВБ до обороняемых объектов и сохранить собственные средства для обеспечения дальнейшего функционирования. В свою очередь МСВБ стремится максимизировать количество пораженных объектов МСНБ. На основе указанных целей составлены показатели эффективности для обеих систем и сформирована задача их конфликтного взаимодействия.

Групповой состав МСВБ: $X_1(t_0)$ — количество тактических ракет пассивного наведения (ТРПН) в МСВБ, нацеленных на поражение ПО МСНБ; $X_2(t_0)$ — количество тактических ракет активного наведения (ТРАН) в МСВБ, причем ракеты активного наведения могут быть нацелены на все объекты МСНБ, 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 МСВБ и АО МСНБ; $X_4(t_0)$ — количество пассивных объектов МСВБ: подразделение штурмовиков (ПШ), авиационная группа сетецентрического управления (АГСУ), головные части баллистических ракет (ГЧБР), которые наносят максимальный урон МСНБ; $X_5(t_0)$ — количество ракет «воздух-воздух» (РВВ), которые предохраняют ТРПН; ТРАН и ПО от поражения ЗУР МСНБ.

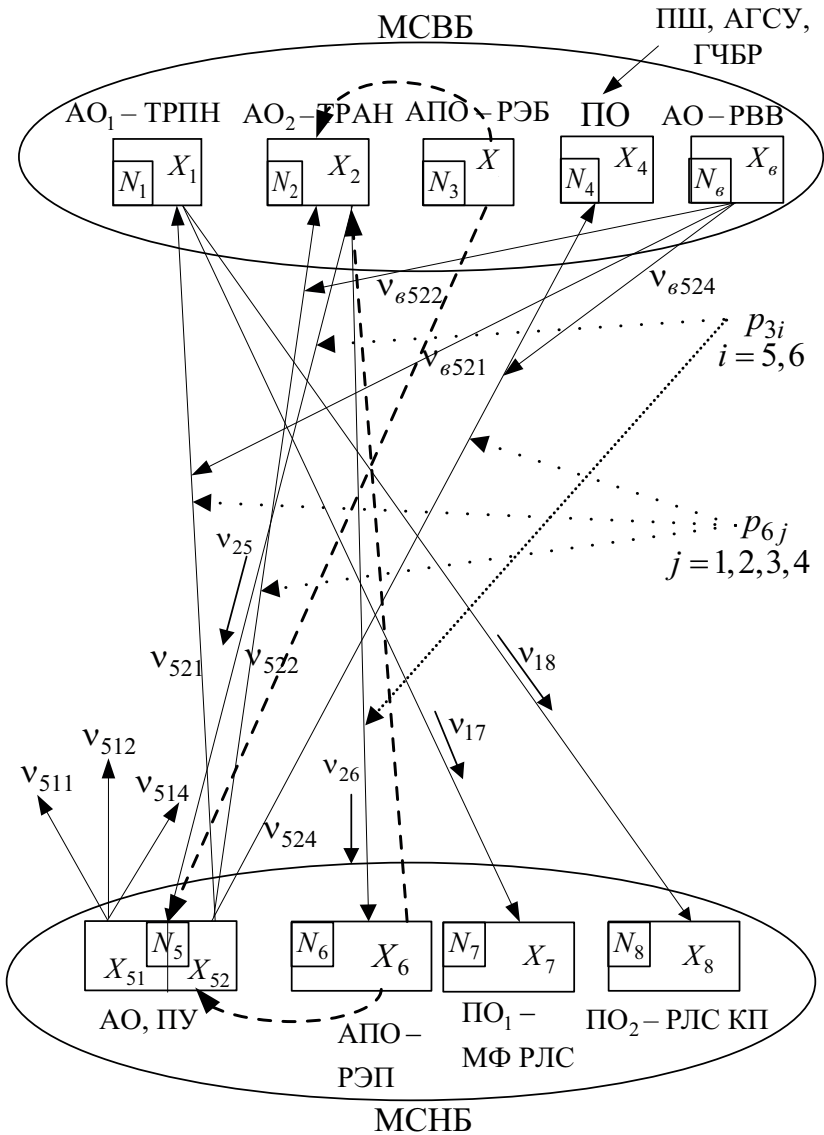


Рис. 3. Общая схема взаимодействия МСНБ (ЗРС «Пэтриот») с МСВБ:
 $x_i(N_i)$, $i = \overline{1,8}$, $x_b(N_b)$ — текущая (начальная) численность; $x_i(t_0) = N_i$,
 $i = \overline{1,8}$, $x_b(t_0) = N_b$ ($\cdots \rightarrow$ — влияние вероятности поражения активных объектов МСНБ и МСВБ при РЭБ и РЭП соответственно)

Групповой состав МСНБ: $X_5(t_0)$ — количество ЗУР (активные объекты); X_{51} — канальность комплексов ЗРС «Пэтриот» средней дальности; X_{52} — канальность комплексов ЗРС «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 пораже-

ния ТРАН МСВБ и АО МСНБ; $X_7(t_0)$ — 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 МСНБ $i = 5, 6$ с учетом влияния РЭП и РЭБ; p_{6i} — вероятность поражения ЗУР «Пэтриот» средств МСВБ $j = 1, 2, 3, 4$ с учетом влияния РЭБ и РЭП.

Общая математическая модель взаимодействия МСНБ и МСВБ на большой дальности (на интервале ΔT_1) описывается системой уравнений конфликта (динамики средних численностей) следующего вида:

$$\begin{cases} X_1(t_1) = X_1(t_0) - p_{521}X_{521}(t_d); X_1(t_0) = N_1, \\ X_2(t_1) = X_2(t_0) - p_{522}X_{522}(t_d); X_2(t_0) = N_2, \\ X_4(t_1) = X_4(t_0) - p_{524}X_{524}(t_d); X_4(t_0) = N_4, \\ X_B(t_d) = 0; X_6(t_0) = N_B, \\ X_{52}(t_1) = 0; X_{52}(t_0) = N_{52}, \\ X_{521}(t_d) = v_{521}X_{52}(t_0) - p_{B521}v_{B521}X_6(t_0), \\ X_{522}(t_d) = v_{522}X_{52}(t_0) - p_{B522}v_{B522}X_6(t_0), \\ X_{524}(t_d) = v_{524}X_{52}(t_0) - p_{B524}v_{B524}X_6(t_0), \end{cases} \quad (1)$$

где $t_d \in (t_0, t_1)$ — момент времени, когда происходит взаимодействие РВВ x_B , нацеленных на поражение ракет большой дальности АО МСНБ; $X_{521}(t_d)$ — количество сохранившихся ракет ЗУР, выделенных для поражения ТРПН после перехвата (к моменту t_d) РВВ МСВБ; $X_{522}(t_d)$ — количество сохранившихся ракет ЗУР, выделенных для поражения ТРАН после перехвата (к моменту t_d) РВВ МСВБ; $X_{524}(t_d)$ — количество сохранившихся ракет ЗУР, выделенных для поражения ПО МСВБ после перехвата (к моменту t_d) РВВ МСВБ.

В данной системе уравнений приняты следующие обозначения: p_{ij} — эффективность воздействия на один объект j -го типа одного объекта i -го типа; v_{ij} — доля активных средств i -го вида, выделенных для воздействия на объект j -го вида (управляющие функции в конфликте), причем

$$v_{521} + v_{522} + v_{524} = 1; \quad v_{B521} + v_{B522} + v_{B524} = 1, \quad (2)$$

где v_{521} — доля X_{52} , выделенных на поражение ТРПН X_1 ; v_{522} — доля ракет X_{52} , выделенных на поражение ТРАН X_2 ; v_{524} — доля X_{52} , выделенных на поражение ПБ X_4 ; v_{B521} — доля X_B , выделенных на перехват от поражения ТРПН X_1 ; v_{B522} — доля X_{52} , выделенных на пере-

хват от поражения ТРАН X_2 ; v_{b524} — доля X_{52} , выделенных на перехват от поражения ПБ X_4 .

Рассматривается конфликтная ситуация взаимодействия МСНБ с РЭП и МСВБ с РЭБ. В конфликтной ситуации под действием РЭБ и РЭП вероятность поражения АО МСНБ и АО МСВБ изменяется по следующим зависимостям:

для МСВБ:

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

μ_i — коэффициент активного влияния РЭП МСНБ на ТРАН; μ_j — коэффициент негативного влияния РЭБ МСВБ на ТРАН;

для МСНБ:

$$p_{ij} = p_{ij_{\max}} \cdot I_{ij}^{\text{МСНБ}} = p_{ij_{\max}} \cdot e^{-\mu_i \cdot \lambda_{\text{РЭП}}} \cdot e^{-\mu_j \cdot \lambda_{\text{РЭБ}}}, \quad i = 5_{1,2}, j = 1, 2, 4 (\mu_i \neq \mu_j); \quad (4)$$

μ_i — коэффициент негативного влияния РЭП МСНБ на ЗУР ЗРС; μ_j — коэффициент активного влияния РЭБ МСВБ на ЗУР ЗРС; $\lambda^{\text{РЭБ}}$ — мощность комплекса РЭБ (нормированная); $\lambda^{\text{РЭП}}$ — мощность комплекса РЭП (нормированная); $p_{ij_{\max}}$ — максимальная вероятность поражения.

Анализ слагаемых в правых частях уравнений и систем (1)–(4) показывает, что каждое слагаемое $p_{ij} v_{ij} X_i$ является средним числом пораженных объектов j -го типа от воздействия $v_{ij} X_i$ объектов i -го типа. При учете реальной конфигурации с вычислением матриц $\{p_{ij}^{\theta\psi}\}$ данные слагаемые принимают следующий вид:

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

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:

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

Теперь система (1) окончательно принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1(t_1) = X_1(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_1(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{521}(t_d)} P_{521}^{\theta\psi} \gamma_{521}^{\theta\psi} \right) I_{521}^{\text{МСНБ}}, \\ X_2(t_1) = X_2(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_2(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{522}(t_d)} P_{522}^{\theta\psi} \gamma_{522}^{\theta\psi} \right) I_{522}^{\text{МСНБ}}, \\ X_4(t_1) = X_4(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_4(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{524}(t_d)} P_{524}^{\theta\psi} \gamma_{524}^{\theta\psi} \right) I_{524}^{\text{МСНБ}}, \\ X_{521}(t_d) = v_{521} X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{521}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{\epsilon}(t_0)} P_{\epsilon 521}^{\theta\psi} \gamma_{\epsilon 521}^{\theta\psi} \right) I_{\epsilon 521}^{\text{МСВБ}}, \\ X_{522}(t_d) = v_{522} X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{522}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{\epsilon}(t_0)} P_{\epsilon 522}^{\theta\psi} \gamma_{\epsilon 522}^{\theta\psi} \right) I_{\epsilon 522}^{\text{МСВБ}}, \\ X_{524}(t_d) = v_{524} X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{524}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{\epsilon}(t_0)} P_{\epsilon 524}^{\theta\psi} \gamma_{\epsilon 524}^{\theta\psi} \right) I_{\epsilon 524}^{\text{МСВБ}}, \\ X_{52}(t_d) = X_{521}(t_d) + X_{522}(t_d) + X_{524}(t_d), \\ \sum_{\psi=1}^{X_1(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{521}(t_d)} \gamma_{521}^{\theta\psi} = X_{521}(t_d); \quad \sum_{\psi=1}^{X_2(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{522}(t_d)} \gamma_{522}^{\theta\psi} = X_{522}(t_d), \\ \sum_{\psi=1}^{X_4(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{524}(t_d)} \gamma_{524}^{\theta\psi} = X_{524}(t_d); \quad \sum_{\psi=1}^{X_{521}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{\epsilon}(t_0)} \gamma_{\epsilon 521}^{\theta\psi} = v_{\epsilon 521} X_{\epsilon}(t_0), \\ \sum_{\psi=1}^{X_{522}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{\epsilon}(t_0)} \gamma_{\epsilon 522}^{\theta\psi} = v_{\epsilon 522} X_{\epsilon}(t_0); \quad \sum_{\psi=1}^{X_{524}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{\epsilon}(t_0)} \gamma_{\epsilon 524}^{\theta\psi} = v_{\epsilon 524} X_{\epsilon}(t_0). \end{array} \right.$$

$$\text{ЦР (МСНБ)} : \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\theta, \psi} P_{ij}^{\theta\psi} \cdot \gamma_{ij}^{\theta\psi} \rightarrow \max \\ \sum_{\theta, \psi} \gamma_{ij}^{\theta\psi} = X_i(t_d) \\ i = 52, j = 1, 2, 4. \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\text{ЦР (МСВБ)} : \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\theta, \psi} P_{ij}^{\theta\psi} \gamma_{ij}^{\theta\psi} \rightarrow \max \\ \sum_{\theta, \psi} \gamma_{ij}^{\theta\psi} = v_{ij} X_{\epsilon}(t_0) \\ i = \epsilon 52, j = 1, 2, 4. \end{array} \right.$$

Показатели потерь (J) в ОПДК имеют смысл суммарного перевеса противника по активным и пассивным средствам и контролю скорости убывания его активных средств:

$$\begin{aligned}
 J_{\text{МСВБ}} = J_1 &= a_{11} [X_{521}^2(t_d) - X_1^2(t_1)] + a_{12} [X_{522}^2(t_d) - X_2^2(t_1)] + \\
 &+ a_{13} [v_{524}^2 X_{52}^2(t_d) - X_4^2(t_1)] + a_{14} [X_{52}^2(t_d)] \rightarrow \min; \\
 J_{\text{МСНБ}} = J_2 &= a_{21} [X_1^2(t_1) - X_{521}^2(t_d)] + a_{22} [X_2^2(t_1) - X_{522}^2(t_d)] + \\
 &+ a_{23} [X_4^2(t_1) - v_{524}^2 X_{52}^2(t_d)] + a_{24} [X_4^2(t_1)] \rightarrow \min.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Оптимизация на этапе ПДК производится по критерию максимизации математического ожидания количества обслуженных целей до момента встречи целей с объектом обороны.

На основе разработанной математической модели (8) – (9), а также обобщенной схемы (см. рис. 1) реализуется метод конфликтно-оптимального управления ресурсами МСНБ и МСВБ в форме комбинированной структуры КС—РЦ—ЦР—ОПДК—РЭБ (РЭП), изображенной на рис. 4.

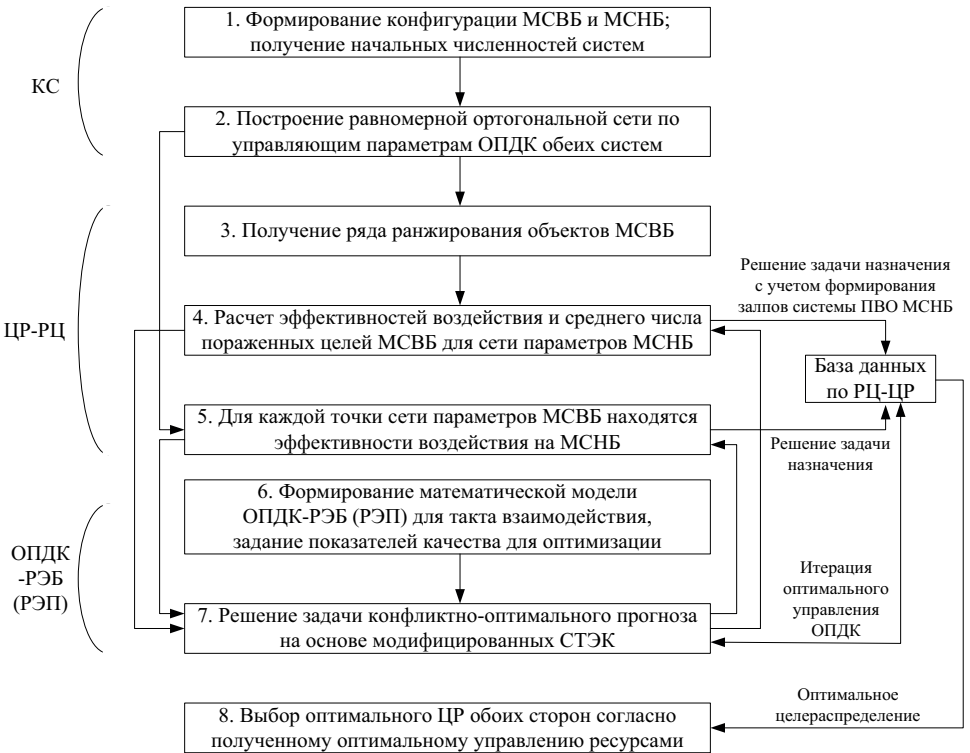


Рис. 4. Алгоритм КС—РЦ—ЦР—ОПДК—РЭБ (РЭП) на рубеже конфликта МСВБ и МСНБ

На *этапе ЦР* обобщается комбинированный метод решения скалярной задачи назначения [4] и разрабатывается алгоритм решения многокритериальной задачи назначения на основе «идеальной» точки. Разработано алгоритмическое обеспечение многокритериальной задачи назначения-ранжирования, где на первом этапе формируется ранжирование объектов МСВБ по многофакторной опасности с комбинированием информационных условий при сравнении критериев и альтернатив по модифицированному методу анализа иерархий (МАИ). На втором этапе формируются варианты комбинации задач назначения и ранжирования в МСНБ при ограниченном числе каналов обслуживания. Использование данного подхода позволяет повысить эффективность анализа больших группировок объектов за счет достаточно простого в вычислительном плане алгоритма, который может применяться в системах реального времени.

На *этапе ОПДК—РЭБ (РЭП)* формируются новые результаты на основе класса активных равновесий [3], которые расширяют область существования равновесий и повышают быстродействие равновесной балансировки на основе равновесий по Нэшу и в форме угроз-контругроз (УКУ) не менее чем на 25...50 %. Дополнена и расширена специализированная программная система многокритериальной оптимизации многообъектных динамических систем (ПС «МОМДИС») в среде *Matlab* с включением в ее состав подпрограмм получения модифицированных стабильно-эффективных компромиссов (СТЭК).

Исследование эффективности разработанного конфликтно-оптимального комбинированного управления ресурсами МСВБ и МСНБ проводилось на серии экспериментов в сравнении с базовым вариантом расчета на двух последовательных рубежах по дальности, приведенным ниже.

1. Конфликт на большой дальности:

– начальные численности

$$X_1 = 14; X_2 = 14; X_4 = 14; X_{52} = 32; X_8 = 12;$$

– весовые коэффициенты (приоритеты систем) в показателях

$$a_{11} = 0,25; a_{12} = 0,25; a_{13} = 0,45; a_{14} = 0,05 \rightarrow \text{МСВБ};$$

$$a_{21} = 0,35; a_{22} = 0,35; a_{23} = 0,25; a_{24} = 0,05 \rightarrow \text{МСНБ};$$

– эффективности воздействия объектов *i*-го типа на объекты *j*-го типа

$$p_{521} = 0,5; p_{522} = 0,5; p_{524} = 0,5; p_{8521} = 0,5; p_{8522} = 0,5; p_{8524} = 0,5;$$

– радиоэлектронная борьба МСВБ и радиоэлектронное противодействие МСНБ — $\mu_{\text{РЭП-В}} = 0,6932$ (коэффициент активного влияния

РЭП МСНБ на АО МСВБ); $\mu_{РЭП-П} = 0,2877$ (коэффициент негативного влияния РЭП МСНБ на ЗУР «Пэтриот»); $\mu_{РЭБ-В} = 0,2877$ (коэффициент негативного влияния РЭБ МСВБ на АО МСВБ); $\mu_{РЭБ-П} = 0,6932$ (коэффициент активного влияния РЭБ МСВБ на ЗУР «Пэтриот»); $\lambda^{РЭБ} = 0,5$ (нормированная мощность комплексов РЭБ); $\lambda_{РЭП} = 0,5$ (нормированная мощность комплексов РЭП).

На большой дальности тактика МСВБ заключается в сохранении ТРПН и ТРАН для создания коридора для ПО ($a_{11}, a_{12}; v_{В521}, v_{В522}$), который необходимо провести через дальний рубеж взаимодействия, и в сохранении ПО (X_4) от ЗУР МСНБ большой дальности ($a_{13}; v_{В524}$). МСНБ стремится не допустить формирования коридора воздействием X_1, X_2 ($a_{21}, a_{22}; v_{521}, v_{522}$) на ПО X_4 ($a_{23}; v_{524}$). Базовый вариант содержит признаки ненасыщенного налета ($40 (28+12) < 56 (32+24)$, МСНБ имеет преимущество по численности).

Для всех серий экспериментов при оптимизации в специализированной программной системе «МОМДИС» выбраны методы оптимизации на основе модифицированных СТЭК: УКУ-решений, СТЭК-1 (равновесие по Нэшу) и СТЭК-7 (обобщенный компромисс) — табл. 1, 2. На графиках результатов экспериментов изображены области решений для соответствующих методов (рис. 5, 6).

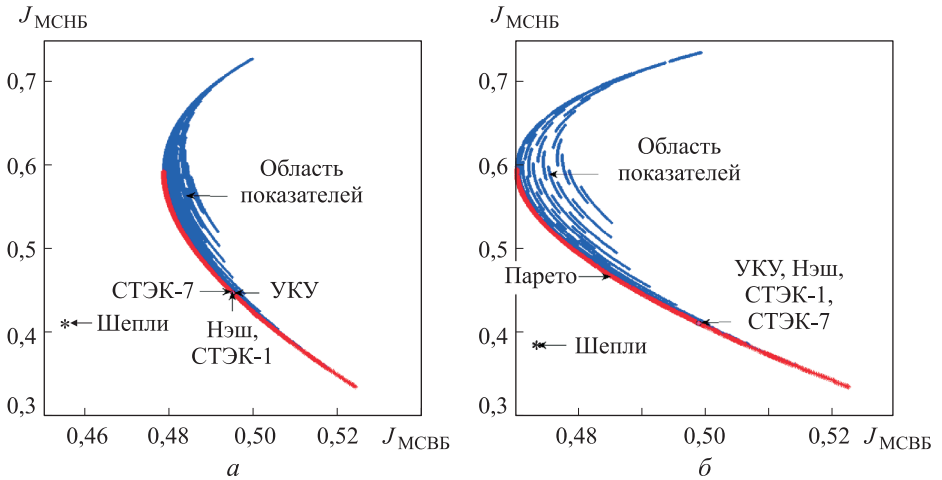


Рис. 5. Область значений нормированных показателей (большая дальность): а — вариант без РЭБ и РЭП; б — вариант с РЭБ и РЭП

Результаты расчета для базового варианта на БД

Показатели			Нач. числ.	Вариант без РЭБ и РЭП		Вариант с РЭБ и РЭП		
				СТЭК-1 (t_1)	СТЭК-7 (t_1)	СТЭК-1 (t_1)	СТЭК-7 (t_1)	
Тип объектов	ТРПН	X_1	14	8,93	8,86 ≈ 9	10,62	10,62 ≈ 11	
	ТРАН	X_2	14	8,8	8,86 ≈ 9	10,53	10,53 ≈ 11	
	ПО	X_4	14	11,27	11,27 ≈ 11	12,18	12,18 ≈ 12	
	ЗУР	X_{52}	32		13/26 (t_d)	13/26 (t_d)	20/28,33 (t_d)	20/28,33 (t_d)
		x_{521}			10,14(t_d)	10,27(t_d)	11,05(t_d)	11,05(t_d)
		x_{522}			10,4(t_d)	10,27(t_d)	11,33(t_d)	11,33(t_d)
x_{524}		5,46 (t_d)			5,46 (t_d)	5,95 (t_d)	5,95 (t_d)	
Р _{ВВ}	$X_в$	12	0	0	0	0		
Доли МСВБ	$v_{в521}$	$x_в \rightarrow x_{521}$		0,39	0,315	0,39	0,39	
	$v_{в522}$	$x_в \rightarrow x_{522}$		0,4	0,315	0,4	0,4	
	$v_{в524}$	$x_в \rightarrow x_{524}$		0,21	0,37	0,21	0,21	
Доли МСНБ	v_{521}	$x_{52} \rightarrow x_1$		0,39	0,38	0,39	0,39	
	v_{522}	$x_{52} \rightarrow x_2$		0,4	0,38	0,4	0,4	
	v_{524}	$x_{52} \rightarrow x_4$		0,21	0,24	0,21	0,21	
Показатели потерь	$J_{МСВБ}$			0,49526	0,49524	0,49957	0,49957	
	$J_{МСНБ}$			0,44723	0,44711	0,41315	0,41315;	
	$J_{МСВБ} + J_{МСНБ}$			0,9425	0,9424	0,9127	0,9127	

2. Конфликт на средней дальности:

– в качестве начальных данных для МСВБ берутся численности объектов после воздействия МСНБ на большой дальности (9 — ТРПН, 9 — ТРАН, 11 — ПО)

$$X_1 = 9; X_2 = 9; X_4 = 11; X_{51} = 24; X_6 = 2; X_7 = 4; X_8 = 2; X_{ПУ} = 8;$$

– весовые коэффициенты (тактические приоритеты)

$$a_{11} = 0,3; a_{12} = 0,3; a_{13} = 0,35; a_{14} = 0,05 \rightarrow \text{МСВБ};$$

$$a_{21} = 0,25; a_{22} = 0,25; a_{23} = 0,45; a_{24} = 0,05 \rightarrow \text{МСНБ};$$

– эффективности воздействия объектов i -го типа на объекты j -го типа

$$p_{17} = 0,5; p_{18} = 0,5; p_{26} = 0,5; p_{2ПУ} = 0,5;$$

$$p_{511} = 0,75; p_{512} = 0,75; p_{513} = 0,75.$$

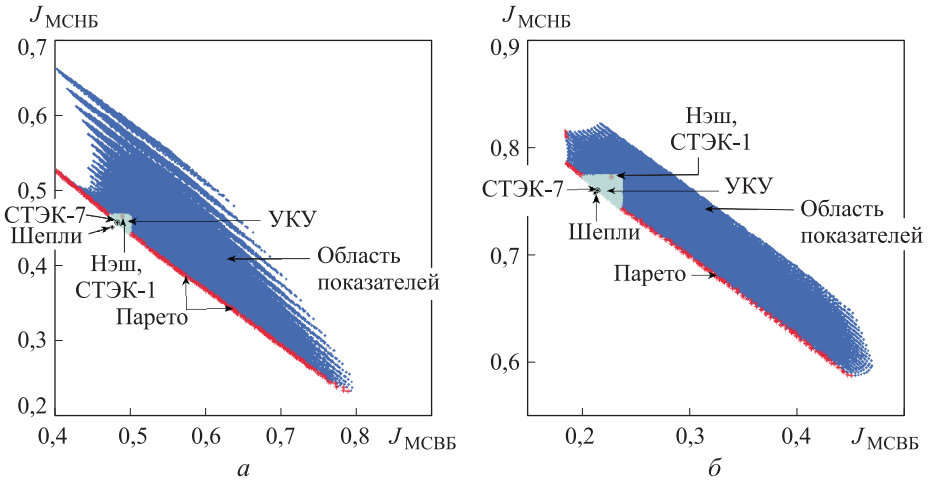


Рис. 6. Область значений нормированных показателей (средняя дальность):
 а — вариант без РЭБ и РЭП; б — вариант с РЭБ и РЭП

Таблица 2

Результаты расчета для базового варианта на СД

Показатели			Нач. числ.	Вариант без РЭБ и РЭП		Вариант с РЭБ и РЭП	
				СТЭК-1 (t_2)	СТЭК-7 (t_2)	СТЭК-1 (t_2)	СТЭК-7 (t_2)
Тип объектов	ТРПН	X_1	9/11	2/4,14 (t_{2d})	3/5,4 (t_{2d})	4/8,8 (t_{2d})	4/8,69 (t_{2d})
	ТРАН	X_2	9/11	2/5,4 (t_{2d})	2/5,22 (t_{2d})	4/8,9 (t_{2d})	4/8,8 (t_{2d})
	ПО	X_4	11/12	1,46	0,38	6,27	5,5
	ЗУР	X_{51}	24	0	0	0	0
	РЭП	X_6	2	2	2	2	2
	МФРЛС	X_7	4	1,93	3,57	1,59	3,58
	КП	X_8	2	2	0	1,72	0
Доли МСВБ	ПУ	$X_{ПУ}$	8	5,3	5,39	5,58	5,31
	v_{17}	$x_1 \rightarrow x_7$		1	0,16	0,89	0,16
	v_{18}	$x_1 \rightarrow x_8$		0	0,84	0,11	0,84
	v_{26}	$x_2 \rightarrow x_6$		0	0	0	0
Доли МСНБ	$v_{2ПУ}$	$x_2 \rightarrow X_{ПУ}$		1	1	1	1
	v_{511}	$x_{51} \rightarrow x_1$		0,27	0,2	0,2	0,21
	v_{512}	$x_{51} \rightarrow x_2$		0,2	0,21	0,28	0,2
Показатели потерь	v_{514}	$x_{51} \rightarrow x_4$		0,53	0,59	0,52	0,59
	$J_{МСВБ}$			0,49233	0,48495	0,23458	0,21929
	$J_{МСНБ}$			0,46647	0,4582	0,77341	0,75812
$J_{МСВБ} + J_{МСНБ}$			0,9588	0,9431	1,008	0,9774	

На основе разработанного алгоритмического и программного обеспечения выполнен многофакторный анализ эффективности управления ресурсами систем с учетом динамически меняющихся конфигураций в следующих направлениях:

– влияние изменения тактики (весовых коэффициентов a_{1i} и a_{2j} , $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$);

– влияние соотношения начальных численностей объектов X_i , $i = \overline{1, 8}$;

– влияние соотношения мощности комплексов РЭБ и РЭП ($\lambda_{РЭБ}$ и $\lambda_{РЭП}$);

– влияние коэффициентов μ_i в функциях вероятностных характеристик комплексов РЭБ и РЭП;

– влияние изменения эффективности (вероятностей поражения) активных средств МСНБ и МСВБ с учетом конфигурации и статистической оценки промаха;

– условия насыщенного налета (превосходство МСВБ над МСНБ по численности).

Моделирование оптимальной динамики двухрубежного конфликтного взаимодействия на основе оптимальной тактики и позиционного прогноза управления показало эффективность разработанного комплексного алгоритма КС—РЦ—ЦР—ОПДК—РЭБ (РЭП) для МСНБ в условиях насыщенного налета МСВБ [6].

Результаты многофакторного анализа влияния указанных факторов на векторы оптимального управления ОПДК, конечных численностей и показателей эффективности с оптимизацией тактики и получением позиционного прогноза управления МСВБ и МБНБ (ЗРС «Пэтриот») [5, 6] могут служить основой для формирования номограмм зависимостей конечных численностей объектов МСНБ от начальных численностей МСВБ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Борзунов А.В., Воронов Е.М., Репкин А.Л., Трушина Н.С., Чеглаков Д.И. Алгоритм управления ресурсами на основе сравнения многокритериальных альтернатив и прогноза динамики конфликта. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2006, № 2, с. 3–29.
- [2] Воронов Е.М. *Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 576 с.
- [3] 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.
- [4] Воронов Е.М., Евстифеев В.В., Чжан Сяньцзянь [и др.]. Комплексный алгоритм многорубежного целераспределения — прогноза динамики кон-

фликта на основе модели ЗРС «Пэтриот». Пупков К.А., ред. *Интеллектуальные системы: Труды X международного симпозиума*. Москва, РУСА-КИ, 2012, с. 347–351.

- [5] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Фролов С.В., Чжан Сяньцзянь. Субоптимальное равновесное позиционное управление многообъектной системой на основе многопрограммной стабилизации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*, 2012, № 4(89), с. 3–17.
- [6] Чжан Сяньцзянь. Метод прогноза конфликтно-оптимального взаимодействия многорубежной ПВО и системы воздушного базирования на основе модели ЗРС «Пэтриот». *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.*, 2012, № 10.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Воронов Е.М., Репкин А.Л., Сяньцзянь Чжан. Управление ресурсами многообъектных систем летательных аппаратов наземного и воздушного базирования в многорубежной конфликтной ситуации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1084.html>

Воронов Евгений Михайлович родился в 1940 г., окончил в 1963 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана и в 1969 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области теории управления, систем управления и ее приложений.

Репкин Алексей Леонидович родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана (Калужский филиал). Канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области теории управления. e-mail: alexr_bmstu@mail.ru

Сяньцзянь Чжан родился в 1984 г., окончил в 2010 г. магистратуру МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры «Системы автоматического управления». Автор 5 научных работ в области теории управления.