

УДК 621.001

А. В. Борзунов, Е. М. Воронов,
А. Л. Репкин, Н. С. Трушина,
Д. И. Чеглаков

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬ- НЫХ АЛЬТЕРНАТИВ И ПРОГНОЗА ДИНАМИКИ КОНФЛИКТА

Рассмотрена модификация метода анализа иерархий для построения процедуры ранжирования целей локальной системы воздушного базирования в задаче управления ресурсами в конфликтной ситуации. На основе прогноза динамики конфликтной ситуации произведена коррекция первоначального управления с учетом дополнительных факторов. Проанализирована эффективность полученного оптимального управления применительно к моделированию взаимодействия систем в реальном времени.

В связи с повышением требований к качеству управления ресурсами современных морских систем ПВО в условиях активного конфликта возникает необходимость в совершенствовании существующих алгоритмов распределения ресурсов. В настоящей работе рассматривается методика формирования комбинированного алгоритма, который включает в себя следующие последовательные этапы: ранжирование целей на основе метода анализа иерархий с использованием текущей информации и автоматизированного экспертного анализа в процессе взаимодействия систем; учет влияния прогноза динамики конфликтно-оптимального взаимодействия локальной системы ПВО (ЛС ПВО) и локальной системы воздушного базирования (ЛС ВБ) на ранжирование целей.

В дополнение к предлагаемому алгоритму сформирован вариант имитационно-исследовательской модели для анализа эффективности применения данного алгоритма в условиях конфликтного взаимодействия.

Алгоритм распределения ресурсов на основе метода сравнения многокритериальных альтернатив. Существующие многочисленные подходы по методам распределения ресурсов базируются на вычислительных схемах математического программирования. Так, в работах [1, 2] рассматриваются скалярные и векторные задачи распределения на основе точных или приближенных методов решения

линейной задачи назначения (выбора). При этом основные показатели в приложении к целераспределению — это среднее число обслуженных объектов и/или время обслуживания и др. В другом примере [3] на основе достаточно общих необходимых условий Куна–Таккера рассматривается задача нелинейного распределения с показателем среднего числа необслуженных объектов с учетом важности (введением весов объектов) при насыщенном налете.

Как правило, предполагается развитая конфигурация систем и одновременность обслуживания [4, 5]. В морской системе ПВО, сосредоточенной на одиночном корабле, в силу специфики оба свойства отсутствуют. Поэтому целераспределение, тем более в условиях насыщенного налета, необходимо базировать на ранжировании целей с формированием скалярного или векторного показателей обобщенного (потенциального и/или реального) предотвращаемого ущерба по группе объектов ЛС ВВ.

Предлагаемый алгоритм распределения ресурсов формирует последовательность обслуживания объектов ЛС ВВ с учетом текущей ситуации и при разных вариантах взаимодействия позволяет выбрать оптимальное управление с учетом прогноза развития конфликтной ситуации.

Для примера рассмотрим следующие типы объектов ЛС ВВ: КР — крылатые ракеты, ПРР — противорадиолокационные ракеты, СР — самолеты-ракетоносцы, самолеты разведки, постановщики помех. Для каждого выбранного объекта ЛС ВВ определяется вероятность выполнения поставленной ему задачи. Для КР — это поражение корабля (попадание КР в борт корабля), для ПРР — выведение из строя излучающих средств корабля (попадание ПРР в средства обнаружения и наведения), для СР — самолета-ракетоносца — пуск КР (выведение самолета в определенную зону пространства); для самолета разведки — передача сведений (нахождение самолета определенное время в зоне разведки); для самолета-помехопостановщика — постановка помех (нахождение самолета определенное время на дальности действия помех) и т.д. Значение этой вероятности для каждого типа объекта и разных точек его возможного положения предварительно вычисляется и заносится в базу данных. Для каждого типа объекта из базы данных берется значение урона, наносимого этим объектом кораблю при условии выполнения объектом поставленной задачи.

Показатель предотвращаемого ущерба. В качестве критерия выбора оптимального варианта рассматривается максимизация ожидаемой эффективности системы ПВО — минимизация ущерба, наносимого кораблю при реализации данного варианта обслуживания. Общая

степень опасности определяется как сумма степеней опасностей, создаваемых каждым объектом. Для разных типов объектов этот показатель имеет различный вид.

Для КР показатель ущерба Q_j (для j -го объекта ЛС ВБ) имеет вид

$$Q_j = G_j P_{\text{ВБ вып } j} (1 - P_{\text{РС пор } j}) = \\ = G_j P_{\text{ВБ вып } j} (1 - P_{\text{РС пор } 0 j}) (1 - P_{\text{РС доп } j}),$$

где G_j — потенциально возможный ущерб, наносимый j -м объектом; $P_{\text{ВБ вып } j}$ — вероятность выполнения j -м объектом поставленной задачи при условии отсутствия воздействия на него ракетного средства (РС); $P_{\text{РС пор } j}$ — вероятность поражения j -го объекта средствами РС; $P_{\text{РС пор } 0 j}$ — вероятность поражения j -го объекта при реализации данного плана целераспределения; $P_{\text{РС доп } j}$ — вероятность поражения j -го объекта в дальнейшем.

Для j -го объекта СР

$$Q_j = \sum_{i=1}^r g_i P_{\text{ВБ вып } i} (1 - P_{\text{РС пор } i}),$$

где r — количество боезапаса СР; g_i — ущерб, наносимый i -й ракетой; $P_{\text{ВБ вып } i}$ — вероятность того, что i -й элемент боезапаса выполнит поставленную перед ним задачу при условии отсутствия воздействия на него РС; $P_{\text{РС пор } i}$ — вероятность поражения i -й ракеты.

Для каждого объекта определяется возможность его дальнейшего обслуживания. Для этого определяется число возможных последовательных пусков средствами РС по данному объекту — m .

$$P_{\text{доп}} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{\text{пор } 0} P_{\text{пуск } i}),$$

где $P_{\text{пуск } i}$ — вероятность осуществления i -го пуска.

Вероятность пуска зависит от среднего времени обслуживания объекта, вероятности поражения, числа каналов и интенсивности налета. Вероятность осуществления i -го пуска определяется как минимальное из двух значений $P_{\text{пуск } i1}$ и $P_{\text{пуск } i2}$:

$$P_{\text{пуск } i} = \min(P_{\text{пуск } i1}, P_{\text{пуск } i2});$$

$P_{\text{пуск } i1}$ — вероятность осуществления i -го пуска с учетом обслуживания только тех объектов, подлетное время которых меньше или равно подлетному времени рассматриваемого объекта; $P_{\text{пуск } i2}$ — вероятность осуществления i -го пуска с учетом обстрела всех обнаруженных на данный момент объектов.

Рассматриваемые вероятности определяются отношением времени возможного обслуживания объекта $t_{\text{обсл } 1}$, определяемого характеристиками налета, и среднего времени $t_{\text{обсл } 0}$, затраченного на поражение объекта и зависящего от характеристик РС. Если данное отношение больше 1, то вероятность принимается равной 1, в противном случае значение вероятности принимается равным $t_{\text{обсл } 1}/t_{\text{обсл } 0}$. Величина $t_{\text{обсл } 0}$ определяется как отношение среднего по всей зоне поражения времени полета средства ПВО и средней по зоне вероятности поражения объекта одним средством ПВО. Величина $t_{\text{обсл } 1}$ определяется отношением времени полета в зоне поражения определенного числа объектов к этому числу объектов, деленному на количество каналов РС. Исходя из вышесказанного, вероятности $P_{\text{пуск } i1}$ и $P_{\text{пуск } i2}$ определяются по формулам:

$$P_{\text{пуск } i1} = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{n_k P_{\text{пор } 0} t_{\text{max } 1}}{t_{\text{обсл } 1} (N_1 + i)} \geq 1; \\ \frac{n_k P_{\text{пор } 0} t_{\text{max } 1}}{t_{\text{обсл } 1} (N_1 + i)}, & \text{если } \frac{n_k P_{\text{пор } 0} t_{\text{max } 1}}{t_{\text{обсл } 1} (N_1 + i)} < 1; \end{cases}$$

$$P_{\text{пуск } i2} = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{n_k P_{\text{пор } 0} t_{\text{max } 2}}{t_{\text{обсл } 2} (N_2 + i)} \geq 1; \\ \frac{n_k P_{\text{пор } 0} t_{\text{max } 2}}{t_{\text{обсл } 2} (N_2 + i)}, & \text{если } \frac{n_k P_{\text{пор } 0} t_{\text{max } 2}}{t_{\text{обсл } 2} (N_2 + i)} < 1, \end{cases}$$

где $t_{\text{обсл}}$ — среднее время обслуживания одного объекта; n_k — число каналов; N_1 — общее число объектов в налете; N_2 — число объектов в налете, подлетное время которых меньше, чем у данного объекта; $P_{\text{пор } 0}$ — осредненная вероятность поражения объекта; $t_{\text{max } 1}$ — максимальное значение времени обслуживания среди всех объектов налета; $t_{\text{max } 2}$ — значение времени обслуживания данного объекта.

Формирование базы данных. Для реализации предложенного алгоритма необходимо создание базы данных, содержащей следующую информацию:

1. Перечень возможных типов объектов ЛС ВБ;
2. Рубежи действия заданных типов объектов ЛС ВБ;
3. Вероятности поражения заданных типов объектов в разных областях зоны поражения для каждого вида РС;
4. Ущерб, наносимый объектом (для всех типов объектов);
5. Вероятность осуществления объектом поставленной перед ним задачи, (зависит от текущего местоположения объекта).

Для нахождения вероятности в п. 3 необходимо для каждого типа объекта ЛС ВБ и РС определить зону поражения, зависящую от возможностей станции обнаружения и РС.

Для нахождения вероятности в п. 5 необходимо для каждого типа объекта определить зону его возможного расположения, зависящую от возможностей станции обнаружения.

Метод сравнения многокритериальных альтернатив. Основным этапом решения задачи распределения ресурсов ЛС ПВО является задача ранжирования целей, т.е. построение объектов в определенном порядке согласно их важности (векторного показателя ущерба). В качестве одного из подходов к решению поставленной задачи ранжирования выбран метод анализа иерархий (МАИ) — метод принятия решений в слабоформализованных задачах [6, 7]. Данный метод имеет более широкую область практического применения, чем другие многокритериальные методы поиска оптимальных альтернатив.

Метод анализа иерархии возник как эвристическое средство сравнения и выбора альтернатив. Область его применения — задачи с относительно небольшим числом заданных альтернатив, когда представляется разумным направить усилия лица, принимающего решение, на сравнение только заданных альтернатив, применительно к задачам ранжирования достаточно сложных объектов, которые нельзя сравнить напрямую между собой.

Метод состоит из следующих основных этапов [6].

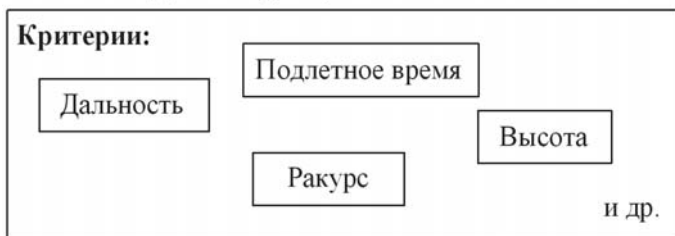
1. Структуризация задачи в виде иерархической структуры с несколькими уровнями: цели–критерии–альтернативы.
2. Лицо, принимающее решение, выполняет попарные сравнения элементов каждого уровня, результаты которых заносятся в таблицы.
3. Вычисляются коэффициенты значимости для элементов каждого уровня (среднее геометрическое из произведений элементов каждой строки таблицы).
4. Подсчитывается количественный индикатор качества каждой из альтернатив (сумма значений произведений каждого из критериев на соответствующие коэффициенты значимости критериев) и определяется наилучшая альтернатива.

Согласно предложенной последовательности действий необходимо на начальном этапе задать необходимое число критериев, наиболее полно отражающее реальную обстановку по ЛС ВБ, по которым будет производиться сравнение альтернатив. Для данной задачи в качестве альтернатив выступают конкретные объекты ЛС ВБ, обладающие определенными численными значениями по каждому выбранному критерию.

В работе рассматривается следующая иерархическая структура согласно схеме (рис. 1).

Следующий шаг метода МАИ — это процедура попарного сравнения критериев на предмет их значимости, которая должна проводиться

Цель: оптимизация опасности
согласно заданным критериям



Альтернативы: имеющиеся объекты
со своими характеристиками по вектору критериев

Рис. 1. Иерархическая структура “цели–критерии–альтернативы” МАИ

с участием ЛПР (лиц, принимающих решения) с обязательным привлечением экспертов. При этом составляется таблица попарных сравнений, в каждой ячейке которой должно стоять число из определенного дискретного диапазона, характеризующее превосходство одного критерия над другим (степень значимости). Полученная матрица будет иметь значения, равные единице, на главной диагонали; выше главной диагонали будут значения из предложенного дискретного диапазона, ниже — их обратные значения, симметрично главной диагонали. Одним из предлагаемых вариантов подобных сравнений является следующий, основанный на задании приоритетов одного критерия над другим:

1 — равная значимость критериев без какого-либо превосходства одного над другим;

3 — умеренное превосходство;

5 — существенное превосходство;

7 — значительное превосходство;

9 — подавляющее превосходство;

2, 4, 6, 8 — промежуточные значения.

Для сформированной таким образом матрицы вычисляется собственный вектор, характеризующий вес каждого фактора: корень m -й степени из произведений элементов каждой строки размерностью $1 \times m$. Для получения коэффициентов значимости каждого критерия полученный собственный вектор подвергается нормировке.

Следующим этапом алгоритма является построение таблиц значений попарного сравнения альтернатив по каждому заданному критерию в отдельности, после чего аналогично вычисляются собственные векторы альтернатив и нормируются их значения для приведения к единому интервальному диапазону $[0; 1]$ для последующего их сравнения с использованием вычисленных коэффициентов значимости.

В результате расчетов каждая альтернатива (объект ЛС ВБ) будет характеризоваться определенным числовым значением опасности согласно полученным коэффициентам значимости критериев. Далее по полученному вектору выполняется процедура ранжирования объектов (чем больше суммарное значение, тем опаснее цель и тем меньший номер будет присвоен данной цели в ряде ранжирования).

Одним из недостатков МАИ является тот факт, что введение новой альтернативы может в общем случае привести к изменению отношений предпочтений между двумя другими альтернативами. Данный недостаток в предлагаемом комбинированном алгоритме можно устранить, проводя процедуру ранжирования целей на каждом временном шаге взаимодействия.

В классическом МАИ попарное сравнение на каждом уровне иерархической модели происходит на основе экспертных оценок. Существенным элементом модификации МАИ является возможность ухода от экспертного сравнения как на уровне альтернатив, так и на уровне критериев. Далее рассматривается модификация метода МАИ для задачи ранжирования объектов по непрерывным критериям. При этом для получения коэффициентов попарных сравнений критериев используется информация о сравнениях альтернатив по каждому из рассматриваемых критериев следующего (по классической схеме МАИ) этапа алгоритма. Следовательно, этапы сравнения критериев и альтернатив необходимо поменять местами (в классической схеме МАИ этапы сравнения независимы, но для предлагаемой модификации метода порядок этапов сравнения принципиально важен).

Отдельно следует отметить тот факт, что при неполноте информации на одном из уровней иерархии МАИ недостаток необходимых для расчета данных может быть скомпенсирован при помощи экспертных оценок на основе создаваемой заранее базы данных по анализу различных вариантов конфигураций ЛС ВБ.

1. Первый этап — построение попарных сравнений альтернатив (рис. 2, шаги 3, 4). Так как диапазон значений альтернатив по каждому из выбранных критериев является ограниченным и непрерывным, следовательно, экспертные оценки можно заменить на отношение конкретных значений пары альтернатив с учетом факта значимости объектов ЛС ВБ по каждому критерию (в большинстве случаев чем меньше значение критерия, тем важнее объект). Для альтернатив i, j по критерию k элемент матрицы сравнения будет вычисляться следующим образом (см. рис. 2, шаг 3):

$$m_{ij}^{(k)} = f_j^{(k)} / f_i^{(k)}, \quad i, j = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, n}.$$

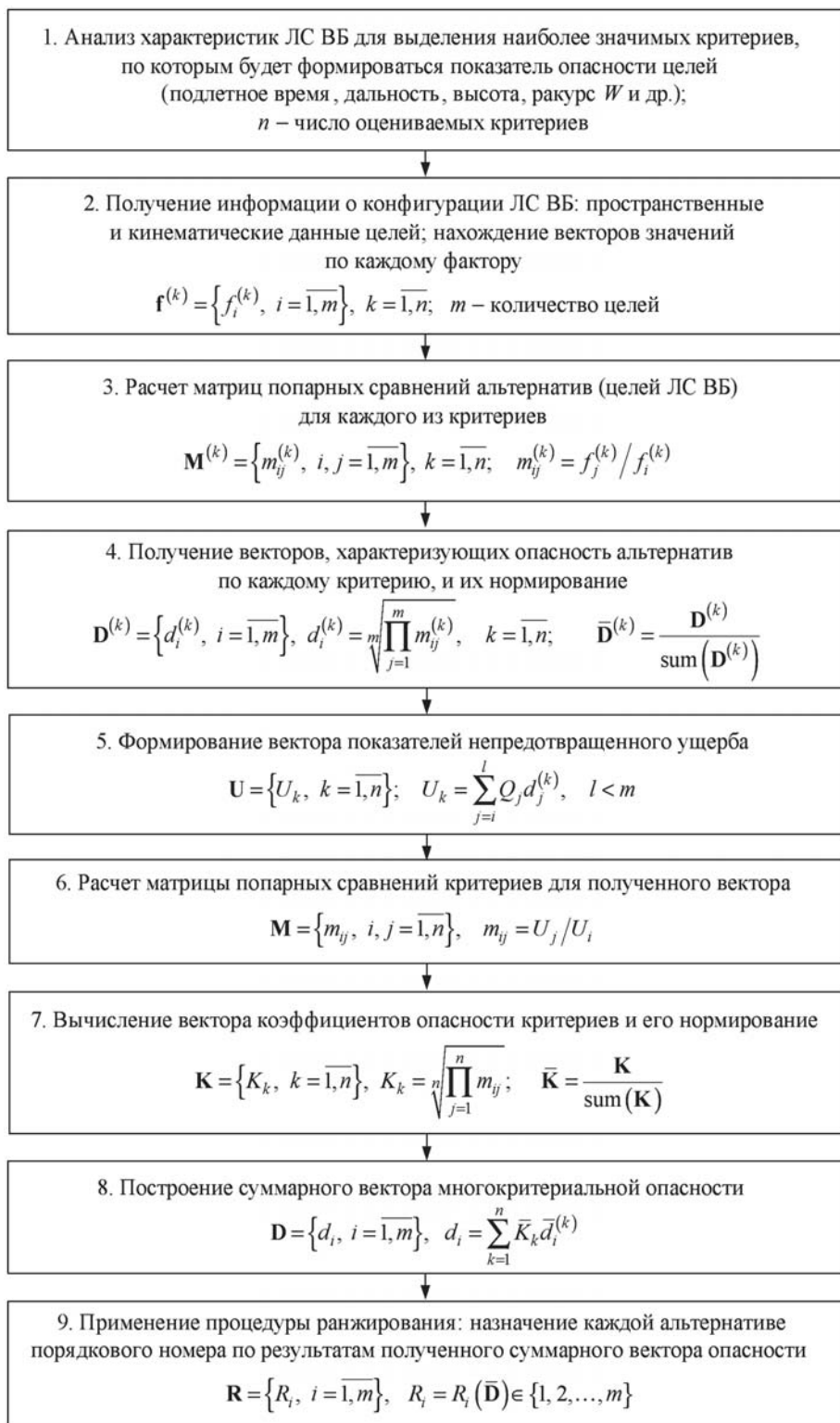


Рис. 2. Алгоритм модифицированного метода аналитической иерархии

Далее для полученных матриц применяется процедура получения собственных векторов, характеризующих значимость альтернатив по каждому выбранному критерию в отдельности.

2. Второй этап — вычисление матрицы попарных сравнений критериев (см. рис. 2, шаги 5, 6). Для этого необходимо сначала решить задачи ранжирования нижнего уровня по каждому критерию. По результатам расчета по каждому критерию будет получена важность целей, поэтому необходимо по каждому ряду ранжирования выбрать определенное число альтернатив, по которому будет производиться оценка значимости каждого критерия: $l < m$.

Далее по каждому критерию составляется сумма (см. рис. 2, шаг 5):

$$U_k = \sum_{j=i}^l Q_j d_j^{(k)}, \quad k = \overline{1, n}, \quad l < m,$$

где Q_j — показатель непредотвращенного ущерба для j -го объекта ЛС ВБ; $d_j^{(k)}$ — относительное значение k -го критерия для j -го объекта. При $l = m$ данная сумма будет фиксированным значением общей опасности, поэтому необходимо ограничиться определенной конечной суммой ряда ранжирования: в качестве оценки U_k выбирать определенное число наиболее опасных целей, т.е. $l < m$. Выбор же величины l может быть привязан к количеству свободных на текущий момент времени каналов ЛС ПВО (либо к другим характеристикам ЛС ПВО). По полученным значениям U_k , аналогично этапу сравнения альтернатив, составляется матрица попарных сравнений критериев путем вычисления отношений этих величин, и далее производится расчет собственного вектора значимостей на уровне критериев.

В результате формируется вектор коэффициентов

$$K_k = K_k(\mathbf{U}, \mathbf{D}^{(k)}), \quad k = \overline{1, n},$$

который после процедуры нормирования может быть использован в качестве коэффициента опасности выбранных критериев. Таким образом, формирование коэффициентов значимостей критериев может проводиться на основе реальных характеристик объектов группировки ВБ.

Алгоритм модифицированного метода аналитической иерархии согласно приведенным рассуждениям приведен на рис. 2.

Для проверки метода создана программа, реализующая случайное автоматическое генерирование конфигурации ЛС ВБ по заданным диапазонам изменения параметров. Ниже приведен пример расчета матриц попарных сравнений для произвольно сгенерированной конфигурации ЛС ВБ со сравнительно небольшим числом объектов.

Рассматриваются три типа объектов: ПРР (1), КР (2) и СР (3). Начальные данные по конфигурации представлены в табл. 1.

Для примера приведена матрица попарных сравнений по первым 10 альтернативам (целям) для вектора подлетного времени (табл. 2).

Таблица 1

Конфигурационные параметры ЛС ВБ

№№	Тип	x , км	y , км	z , км	Расстояние, км	Скорость, км/ч	Подлетное время, с	Ракурс (начальный промах), км
1	2	15	1	0,22	15,035	0,700	21,478	1,024
2	2	17	-1	0,14	17,030	0,883	19,296	3,232
3	2	21	0	0,26	21,002	0,767	27,393	0,260
4	2	17	1	0,28	17,032	1,023	16,657	5,371
5	2	18	1	0,13	18,028	0,752	23,973	3,990
6	2	14	-1	0,21	14,037	1,033	13,584	1,022
7	1	14	-1	0,32	14,039	0,533	26,324	1,050
8	1	18	0	0,22	18,001	0,591	30,476	4,868
9	1	13	0	0,16	13,001	0,700	18,573	0,160
10	1	12	1	0,24	12,044	0,657	18,319	5,962
11	1	17	1	0,33	17,033	0,496	34,372	5,499
12	1	13	0	0,31	13,004	0,533	24,382	0,310
13	1	10	0	0,21	10,002	0,716	13,976	4,472
14	1	17	-1	0,27	17,032	0,800	21,289	1,036
15	3	32	1	0,32	32,017	0,367	87,319	1,050
16	3	28	-1	0,45	28,022	0,567	49,449	1,097
17	3	36	1	0,41	36,016	0,533	67,530	1,081
18	3	33	0	0,35	33,002	0,600	55,003	0,350
19	3	26	0	0,27	26,001	0,200	130,007	0,270
20	3	34	1	0,43	34,017	0,300	113,391	1,089

Таблица 2

Матрица попарных сравнений для вектора подлетного времени

№№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,000	0,898	1,275	0,776	1,116	0,633	1,226	1,419	0,865	0,853
2	1,113	1,000	1,420	0,863	1,242	0,704	1,364	1,579	0,963	0,949
3	0,784	0,704	1,000	0,608	0,875	0,496	0,961	1,113	0,678	0,669
4	1,289	1,159	1,645	1,000	1,439	0,816	1,580	1,830	1,115	1,100
5	0,896	0,805	1,143	0,695	1,000	0,567	1,098	1,271	0,775	0,764
6	1,581	1,421	2,017	1,226	1,765	1,000	1,938	2,244	1,367	1,349
7	0,816	0,733	1,041	0,633	0,911	0,516	1,000	1,158	0,706	0,696
8	0,705	0,633	0,899	0,547	0,787	0,446	0,864	1,000	0,609	0,601
9	1,156	1,039	1,475	0,897	1,291	0,731	1,417	1,641	1,000	0,986
10	1,172	1,053	1,495	0,909	1,309	0,742	1,437	1,664	1,014	1,000

Далее приведена таблица (табл. 3), в которой помещены значения собственных векторов и ряда ранжирования по каждому выбранно-

Векторы D_i собственных значений, индикатор качества D и ряды ранжирования

№№№	D_1	Ранг1	D_2	Ранг2	D_3	Ранг3	D_4	Ранг4	D	Ранг
1	0,061	8	0,059	7	0,056	6	0,034	7	0,056	9
2	0,068	6	0,052	8	0,088	2	0,011	14	0,062	4
3	0,048	12	0,042	14	0,048	9	0,133	2	0,057	8
4	0,079	3	0,052	10	0,044	12	0,006	18	0,054	10
5	0,055	9	0,049	13	0,095	1	0,009	15	0,058	7
6	0,097	1	0,063	5	0,059	4	0,034	6	0,070	3
7	0,050	11	0,063	6	0,039	14	0,033	10	0,048	12
8	0,043	13	0,049	12	0,056	7	0,007	17	0,043	13
9	0,071	5	0,068	3	0,077	3	0,216	1	0,091	1
10	0,072	4	0,073	2	0,051	8	0,006	20	0,058	6
11	0,038	14	0,052	11	0,037	16	0,006	19	0,037	15
12	0,054	10	0,068	4	0,040	13	0,111	4	0,061	5
13	0,094	2	0,088	1	0,059	5	0,008	16	0,072	2
14	0,062	7	0,052	9	0,046	10	0,033	8	0,051	11
15	0,015	18	0,028	17	0,039	15	0,033	9	0,027	18
16	0,027	15	0,032	16	0,027	20	0,032	13	0,029	17
17	0,020	17	0,025	20	0,030	18	0,032	11	0,025	19
18	0,024	16	0,027	18	0,035	17	0,099	5	0,037	16
19	0,010	20	0,034	15	0,046	11	0,128	3	0,041	14
20	0,012	19	0,026	19	0,029	19	0,032	12	0,022	20

му критерию (см. рис. 2, шаг 3), а также суммарный вектор, полученный с помощью критерия непредотвращенного ущерба, и общий ряд ранжирования альтернатив. Для приведенных расчетов в качестве непредотвращенного ущерба, как вариант, использовался фактор подлетного времени: значения нормированного вектора, полученного по критерию подлетного времени как одному из наиболее важных при ранжировании целей.

Здесь каждому объекту ЛС ВБ поставлено в соответствие число, характеризующее данный объект по факту опасности: наиболее опасному объекту — 1, наименее — 20. Таким образом, наиболее опасный объект имеет номер 9, следующий — номер 13, далее — 6 и т.д. Естественно, порядок ранжирования по каждому из критериев не совпадает с другими критериями. Поэтому необходимо определить значимости выбранных критериев, чтобы построить единый ряд ранжирования по единому суммарному вектору.

Весовые коэффициенты значимости критериев при этом были рассчитаны, исходя из частичных сумм с $l = 6$. Нормированный вектор

коэффициентов значимости критериев имеет вид

$$K = [0,357; 0,249; 0,265; 0,129].$$

Следует отметить, что, так как происходит нормирование собственного вектора опасности (см. рис. 2, шаг 4), плотность результатов достаточно высока, и при небольшом изменении весовых коэффициентов значимости критериев могут происходить изменения в ряде ранжирования относительно близких по опасности альтернатив. В принципе, это не особенно важно, так как задачей ранжирования в большинстве случаев является выбор некоторой группы наиболее опасных объектов, которые, как правило, в ряде ранжирования достаточно явно обозначены (тем более, если ранжирование производится в конкретный момент времени для выбора одного-двух наиболее опасных объектов ЛС ВБ).

Таким образом, получено решение многокритериальной задачи ранжирования на основе метода анализа иерархий. 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. Было также проведено сравнение результатов, полученных на основе модифицированного МАИ, с имеющимися в наличии результатами работы существующего алгоритма. Даже при использовании алгоритма МАИ с матрицей попарного сравнения критериев на основе экспертного анализа анализ результатов подтвердил эффективность предлагаемой методики ранжирования объектов ЛС ВБ.

2. Задача прогноза. Ранее была построена схема многокритериального ранжирования объектов ЛС ВБ. Как вариант, можно напрямую воспользоваться рекомендациями по организации взаимодействия с учетом полученного ряда ранжирования (например, когда необходимо выделить одну-две наиболее опасных целей при освобождении одного из каналов ЛС ПВО). Однако можно выделить существенные факторы, которые должны быть учтены при распределении ресурсов ЛС ПВО.

В работах [1, 4, 5] рассмотрены вычислительные алгоритмы, реализующие распределение ресурсов на основе конфликтно-оптимального прогноза (КОП) в системах с развитой конфигурационной топологией. Отличительной особенностью данной задачи является то, что конфигурация ЛС ПВО, представляющей собой одиночный корабль, фактически вырождена в точку. Следовательно, основное направление оптимизации управления ресурсами ЛС ПВО необходимо базировать на предложенном ранее алгоритме модифицированного ранжирования целей, при этом использование конфликтно-оптимального прогноза

на основе динамики средних численностей позволяет определенным образом скорректировать управление с учетом следующих факторов:

1) возможности управления мощностью группировки со стороны системы ВБ, которая организует большее насыщение ЛС ПВО;

2) возможности перехода части пассивных объектов ЛС ВБ (а именно СР) в активные, т.е. потенциально возможного пополнения численности объектов ЛС ВБ в силу активных действий СР на рубеже атаки по запуску дополнительных ПРП по системе ПВО;

3) учета тактических приоритетов по воздействию на объекты определенных групп обеих сторон конфликта на момент окончания предполагаемого взаимодействия, состоящего из залпового обмена имеющихся у обеих систем активных объектов.

Для реализации конфликтно-оптимального прогноза должна быть составлена математическая модель предполагаемой конфликтной ситуации, а также записаны тактические показатели, подлежащие минимизации в процессе расчета оптимального управления ресурсами ЛС ВБ и ЛС ПВО.

Таким образом, конфликтно-оптимальный прогноз взаимодействия позволяет влиять на задачу распределения ресурсов ЛС ПВО путем корректировки исходного варианта взаимодействия с ЛС ВБ, полученного по методу ранжирования целей, на основе выявления долей целевых каналов для обслуживания типов и групп объектов ЛС ВБ, а также на основе учета управляемой мощности насыщенного налета ЛС ВБ при наличии определенной тактики обеих сторон конфликта.

В фиксированный момент времени (начало взаимодействия) рассмотрена задача взаимодействия корабля с ЛС ВБ, состоящей в основном из активных объектов, воздействующих либо на борт корабля (пассивный объект ЛС ПВО), либо на излучающие станции наведения и целеуказания (активные объекты ЛС ПВО).

По полученной на текущий момент информации решается задача ранжирования целей группы ЛС ВБ на предмет потенциальной опасности для ЛС ПВО, и в принципе по полученному ряду ранжирования уже может проводиться целераспределение. На момент начала взаимодействия (т.е. на момент пуска первого активного средства со стороны ЛС ПВО по ЛС ВБ) может быть проведен прогноз для более эффективного распределения имеющихся у ЛС ПВО средств по активным объектам ЛС ВБ различного типа (КР и ПРП). Параллельно решается задача определения предполагаемого потенциала ЛС ВБ: количество объектов, находящихся в воздухе, но еще не обнаруженных радаром ЛС ПВО. С учетом полученного прогноза строится модифицированное целераспределение на основе приведенной ранее процедуры ранжирования целей. При этом учитывается тот факт, что ЛС ВБ потенциально может быть значительно больше по численности активных

объектов, направленных на поражение ЛС ПВО, а также возможность пополнения активных объектов ЛС ВБ за счет собственных пассивных объектов (СР), которые потенциально могут выпускать определенное количество ракет при приближении к эффективной зоне пуска.

Конфигурация систем имеет следующий вид: в центре находится объект ЛС ПВО — корабль, на борту которого имеются два комплекса ПВО со своими станциями наведения и целеуказания. Система ПВО в целом рассматривается как точечный объект, с одними общими координатами (например, $(0; 0)$). ЛС ВБ представляет собой группу преимущественно активных объектов, направленных на корабль. Рассматривается налет, насыщающий ЛС ПВО: численность ЛС ВБ — 10...30 объектов. Конфигурация ЛС ВБ может быть различной, но в работе рассматривается линейный вид расположения объектов в конкретном секторе воздействия ЛС ПВО. Основная цель ЛС ПВО — выделить из общей группы объектов ЛС ВБ наиболее опасные и произвести собственное целераспределение с учетом возможной тактики противника; основная задача ЛС ПВО — сохранение собственных объектов (в частности, обеспечение живучести корабля).

Графически схема конфликта представлена на рис. 3.

Состав первой группы (активных) объектов ЛС ВБ (реализующих непосредственную угрозу кораблю):

$X_1(0)$ — количество ПРП в ЛС ВБ;

$X_2(0)$ — количество КР в ЛС ВБ.

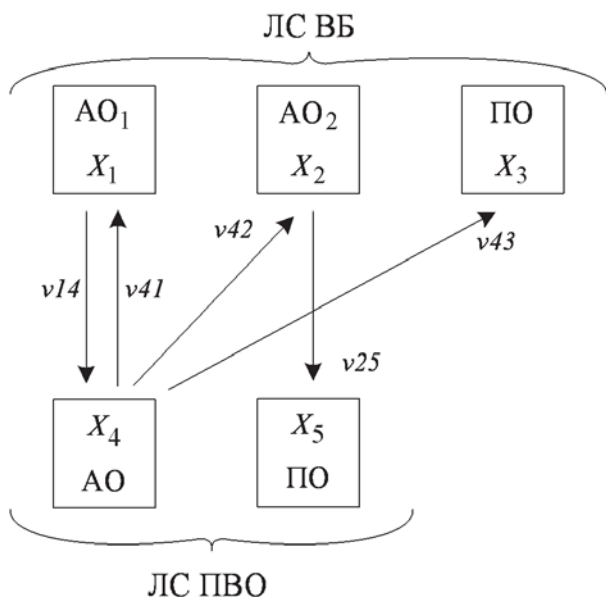


Рис. 3. Схема конфликта ЛС ВБ — ЛС ПВО

Состав второй группы (пассивных) объектов ЛС ВБ (представляющих потенциальную опасность для корабля):

$X_3(0)$ — количество СР (самолетов-ракетоносцев).

Возможно также введение в последнюю группу самолетов разведки и постановки помех.

Состав средств ЛС ПВО корабля:

$X_4(0) = X_{4н}(0) + X_{4цп}(0)$ — РЛС наведения и РЛС целеуказания, которые поражаются ПРР;

$X_5(0)$ — минимальное количество КР, гарантирующее потерю живучести корабля (текущее значение X_5 — степень живучести).

Количество ракет, выпускаемых корабельными ЗРК, равно

$$X_{4р}(0) = n_k X_{4н}(0),$$

где n_k — канальность ЗРК; $X_{4н}(0)$ — количество РЛС наведения;

$$1 \leq X_5(0) \leq N_{п},$$

где $N_{п}$ — максимальное число пробоин для полного уничтожения корабля (далее при расчетах принимается $N_{п} = 3$).

Потенциально СР могут выпускать $N_{д}$ ракет каждый (максимальный боезапас пассивных средств ЛС ВБ), в систему уравнений динамики средних необходимо ввести фактор пополнения численности ПРР в зависимости от количества СР, которые на данный момент времени располагаются близко к границе зоны пуска ракет по ЛС ПВО (с учетом времени полета средств ЛС ПВО для поражения текущего объекта группы СР). При проведении анализа конфигурации ЛС ВБ по текущей воздушной обстановке выявляются такие объекты СР, значение опасности которых больше порогового значения по дальности $R_{СР}$, характеризующего потенциальную опасность пуска ракет согласно предполагаемой вероятности нанесения урона ЛС ПВО. Обозначим их количество как $X_{3а}$, $X_{3а}(0) < X_3(0)$; $X_{3п}(0) = X_3(0) - X_{3а}(0)$. Тогда фактор пополнения числа объектов ПРР может быть записан в виде

$$X_{1д}(1) = N_{д} \sum_{i=1}^{X_{3а}(1)} P_{ВБ \text{ пуск } i}^{\theta\psi}$$

— число возможных выпущенных ракет группой СР; $P_{ВБ \text{ пуск } i}^{\theta\psi}$ — вероятность пуска ракет объектами СР с пространственными координатами ψ относительно корабля θ . При этом в систему уравнений входит именно значение $X_{1д}(1)$, а не $X_{1д}(0)$, т.е. численность оставшихся после взаимодействия активных объектов СР $X_{3а}(1)$, которая, в принципе, является функцией параметра ν_{43} . Также предполагается, что

количество КР в ЛС ВБ не зависит от числа СР, т.е. объекты СР являются носителями только средств ПРР (можно предусмотреть и введение нескольких типов СР, являющихся потенциальными носителями нескольких видов активных объектов).

Уравнения динамики средних на начальном такте конфликта ЛС ВБ—ЛС ПВО, когда все целевые каналы ЗРК свободны, имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1(1) = X_1(0)\nu_{14} - \sum_{\psi} P_{41}^{\theta\psi} \gamma_{41}^{\theta\psi} + X_{1л}(1); \\ X_2(1) = X_2(0)\nu_{25} - \sum_{\psi} P_{42}^{\theta\psi} \gamma_{42}^{\theta\psi}; \\ X_3(1) = X_3(0) - \sum_{\psi} P_{43}^{\theta\psi} \gamma_{43}^{\theta\psi}; \\ X_4(1) = X_4(0) - P_{14} \tilde{P}_{41} X_1(1); \\ X_5(1) = X_5(0) - P_{25} \tilde{P}_{42} X_2(1); \end{array} \right.$$

$$\nu_{41} + \nu_{42} + \nu_{43} = 1, \quad 0 \leq \nu_{4i} \leq 1, \quad i = \overline{1, 3};$$

$$1 \leq \nu_{14} \leq M_1; \quad 1 \leq \nu_{25} \leq M_2;$$

здесь $\gamma_{4i}^{\theta\psi} = 1$ — объекты ЛС ВБ i -й группы в точках ψ , выделенные для обслуживания ЛС ПВО после ранжирования целей согласно текущему варианту управления ресурсами (для необслуживаемых объектов ЛС ВБ $\gamma_{4i}^{\theta\psi} = 0$); M_1, M_2 — предполагаемые мощности налета для групп объектов ПРР и КР (в качестве примера рассматривается вариант $M_1 = M_2 = 2$ — двукратное потенциально возможное превышение числа активных объектов ЛС ВБ); $P_{4i}^{\theta\psi}$ — вероятность поражения объекта ЛС ВБ i -й группы, находящегося в конкретной точке ψ относительно корабля θ на момент прогноза, на который выделено активное средство ЛС ПВО. Если значения $P_{4i}^{\theta\psi}$ достаточно близки, то их можно заменить по формуле

$$\sum_{\psi} P_{4i}^{\theta\psi} \gamma_{4i}^{\theta\psi} = \bar{P}_{4i} \nu_{4i} X_{4р}(0),$$

где \bar{P}_{4i} — средние вероятности поражения объектов i -й группы ЛС ВБ; ν_{4i} — доли выделяемых активных средств ЛС ПВО общей численностью $X_{4р}(0)$ для воздействия на i -ю группу ЛС ВБ. Множители \tilde{P}_{4i} , входящие в последние два уравнения, можно рассматривать либо как фактор, отражающий снижение эффективности воздействия активных средств ЛС ВБ на объекты ЛС ПВО из-за постановки помех со стороны ЛС ПВО, либо как вероятность дальнейшего непоражения объектов ЛС ВБ, действующих на ЛС ПВО $\left(\tilde{P}_{4i} = 1 - P_{4i} \right)$.

В уравнениях для $X_4(1)$ и $X_5(1)$ ЛС ВБ воздействует на ЛС ПВО оставшимися численностями после воздействия ЛС ПВО на объекты ЛС ВБ, т.е. физически имеет место так называемое право первого хода со стороны ЛС ПВО. Можно построить и более детальное описание математической модели с учетом нескольких подтактов на общем временном интервале взаимодействия. В настоящей работе при расчетах рассматривается предложенная модель.

Доля ν_{43} выделяемых средств ПВО на взаимодействие с пассивными объектами ЛС ВБ, если она не равна нулю, прежде всего будет направлена на $X_{3a}(0)$ при их наличии, поэтому нет необходимости разделять третье уравнение системы на два, которые отдельно отражали бы динамику пассивных и активных СР. Данный факт также должен быть отражен при составлении показателей каждой из коалиций. В этом случае третье уравнение математической модели можно представить следующим образом:

$$\{X_{3a}(1) = X_{3a}(0) - P_{43}\nu_{43}X_{4p}(0)\}, \text{ если } X_{3a}(0) \geq \nu_{43}X_{4p}(0);$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{3a}(1) = X_{3a}(0) - P_{43}\nu'_{43}X_{4p}(0) \\ X_{3п}(1) = X_{3п}(0) - P_{43}\nu''_{43}X_{4p}(0) \end{array} \right\}, \text{ если } X_{3a}(0) < \nu_{43}X_{4p}(0);$$

$$\nu'_{43} + \nu''_{43} = \nu_{43}; \quad X_{3a}(0) = \nu'_{43}X_{4p}(0).$$

Может быть предложен другой вариант системы уравнений динамики средних, основанный не на предполагаемых мощностях налета ЛС ВБ, а на максимально известной конкретной мощности ЛС ВБ, относительно которой управляющие параметры будут изменяться не в пределах $[1, M_i]$, а на интервале $[m_i, 1]$, $i = 1, 2$, где m_i зависят от реальных текущих численностей групп объектов ЛС ВБ $X_i(0)$. Изменение управляющих параметров ЛС ВБ при необходимости может быть определенным образом привязано к конкретным действиям со стороны пассивных средств ЛС ВБ — СР. При этом нижний предел изменения параметров должен зависеть от реального количества целей ЛС ВБ на текущий момент времени, когда решается задача прогноза.

Дисперсия рассеяния средних

$$\sigma_i = X_i(1) \left(1 - \frac{X_i(1)}{X_i(0)} \right).$$

Очевидно, что при тактике взаимодействия, приводящей либо к полному уничтожению одних средств (первый сомножитель выражения), либо к максимальному сохранению других средств (второй сомножитель выражения), значение дисперсии близко к нулю.

Показатели сторон задаются в следующем виде:

$$J_{\text{ВБ}} = J_1 = \alpha_1 \left[\bar{X}_4^2(1) - ((\bar{X}_1(1) + \bar{X}_2(1))/2)^2 \right] + \alpha_2 \left[\bar{X}_5^2(1) - \bar{X}_3^2(1) \right] + \alpha_3 \left[\bar{X}_1(1)(\nu_{14} - 0,75M_1)^2 + \bar{X}_2(1)(\nu_{25} - 0,75M_2)^2 \right] - \alpha_4 \sum Q_i \rightarrow \min;$$

$$J_{\text{ПВО}} = J_2 = \beta_1 \left[\left(((\bar{X}_1(1) + \bar{X}_2(1))/2)^2 - \bar{X}_4^2(1) \right) + (\bar{X}_{3a}^2(1) - \bar{X}_5^2(1)) \right] + \beta_2 \left[\bar{X}_{3n}^2(1) - \bar{X}_5^2(1) \right] + \beta_3 \sum Q_i \rightarrow \min;$$

$$\bar{X}_i(1) = X_i(1)/X_i(0); \quad \sum \beta_i = 1, \quad 0 \leq \beta_i \leq 1;$$

$$\sum \alpha_i = 1, \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1.$$

Приведенные критерии имеют смысл минимизации перевеса по количеству активных и пассивных объектов, оставшихся к концу первого такта взаимодействия, для обеих ЛС. Кроме того, третье слагаемое в критерии ЛС ВБ связано с определенной экономией количества активных объектов ЛС ВБ в диапазоне их возможного сосредоточения к началу первого такта взаимодействия. В данной задаче для корректного сравнения получаемых решений в области значений показателей удобнее использовать нормированные численности $\bar{X}_i(1)$.

Управляющие параметры прогноза ЛС ПВО корабля ($\nu_{4i}, i = \overline{1,3}$) характеризуют распределение долей целевых каналов корабельных ЗРК, выделяемых для обслуживания ПРР, КР и СР соответственно в условиях конфликтно-оптимального ограниченного по мощности активных объектов (ν_{14}, ν_{25}) насыщенного налета ЛС ВБ (см. рис. 3).

Существенным элементом тактического прогноза действий ЛС ПВО корабля является преимущественное уничтожение активных объектов ЛС ВБ, поэтому $\beta_1 > \beta_2$. Наоборот, существенным элементом тактического прогноза действий ЛС ВБ является потопление корабля. Поэтому $\alpha_2 > \alpha_1$. В этом случае, как было отмечено выше, дисперсии невелики и средние численности $X_i(1), i = \overline{1,5}$ близки к истинным.

Слагаемое $\sum Q_i$ отражает минимизацию показателя непредотвращенного ущерба по оставшимся объектам ЛС ВБ после такта взаимодействия для ЛС ПВО и максимизацию — для ЛС ВБ. При расчетах данный показатель формировался следующим образом.

В качестве потенциально возможного ущерба G_i (при отсутствии базы данных по данному параметру) был выбран фактор подлетного времени как относительно более важный параметр, характеризующий

опасность объектов ЛС ВБ: значение G_i принималось равным значению нормированного вектора, построенного по критерию подлетного времени в методе АИ (аналогично методу анализа иерархий на этапе сравнения критериев). Вероятность поражения объектов ЛС ВБ средствами РС $P_{\text{РС пор } i}$ принималась пропорционально дальности с использованием допустимого диапазона изменения. Вероятность $P_{\text{ВБ вып } i}$ может быть задана как среднее значение вероятности воздействия объектов ЛС ВБ конкретного типа. С учетом сделанных допущений формула для вычисления показателя непредотвращенного ущерба может быть представлена в виде (суммирование предполагается по тем объектам ЛС ВБ, по которым не осуществлялось воздействие ЛС ПВО)

$$\sum Q_i = \bar{X}_1(1) P_{\text{ВБ вып } 1} \sum G_{1i} + \bar{X}_2(1) P_{\text{ВБ вып } 2} \sum G_{2i} + \\ + \bar{X}_{3a}(1) P_{\text{ВБ вып } 3a} \sum G_{3ai} + \bar{X}_{3п}(1) P_{\text{ВБ вып } 3п} \sum G_{3пи}.$$

Многократное решение задачи при различных начальных наборах $X_1(0)$, $X_2(0)$, $X_3(0)$ позволяет получить наборы оценок ν_{ij} , а также вектора $\nu_{14}X_1(0)$, $\nu_{25}X_2(0)$, $X_3(0)$. Все эти результаты могут быть помещены в базу данных. Далее при появлении информации о составе налета ЛС ВБ необходимо найти близкий по значениям вектор базы данных $\nu_{14}X_1(0)$, $\nu_{25}X_2(0)$, $X_3(0)$ и использовать соответствующее распределение долей целевых каналов

$$\nu_{4i}X_{4p}(0), \quad i = \overline{1, 3}.$$

В качестве основного недостатка предлагаемого алгоритма ЦРКОП является то, что при составлении базы данных по вариантам изменения управляющих параметров ЛС ПВО в зависимости от многих факторов достаточно трудно определить базовые варианты по этим факторам (в которые, собственно, входит и конфигурация ЛС ВБ), для которых должны быть проведены предварительные просчеты по коррекции управления. Дискретная равномерная сеть для составления базы данных приводит к слишком большому объему вычислений подобных вариантов, следовательно, возникает необходимость применения дополнительных эвристических подходов при определении базовых вариантов, которые необходимо помещать в базу данных.

Далее следует совмещение полученных результатов с задачей ранжирования целей. Один из предлагаемых вариантов совмещения — перекрестное ранжирование с использованием информации о рациональном соотношении оптимальных долей $\nu_{41}/\nu_{42}/\nu_{43}$ при взаимодействии с наиболее опасными объектами ЛС ВБ: следование тактике оптимального управления до полного ее выполнения по взаимодействию с наиболее опасными целями групп объектов каждого типа.

При полной реализации полученного управления с учетом прогноза дальнейшее взаимодействие (на текущий момент освобождения канала ЗРК) осуществляется по наиболее опасной цели из общей группы объектов ЛС ВБ.

В качестве начальных приближений для решения задачи прогноза целесообразно использовать доли ν_{4i}^0 , $i = \overline{1, 3}$ выделяемых каналов ЛС ПВО, получаемые по результатам ранжирования целей общей группы целей ЛС ВБ на начальном этапе получения информации о воздушной обстановке.

Далее приведен вариант расчета, показывающий влияние конфликтно-оптимального прогноза на коррекцию управления ЛС ПВО при взаимодействии с ЛС ВБ с учетом управления мощностью налета ЛС ВБ, тактики обеих систем, потенциальной опасности пуска СР дополнительных ракет и текущей конфигурации ЛС ВБ. Данные о конфигурации ЛС ВБ приведены ранее в задаче ранжирования целей.

Исходные данные для расчета:

$$X_1(0) = 6; X_2(0) = 8; X_3(0) = 6; X_{3a}(0) = 2; N_d = 4; R_{CP} = 30;$$

$$X_{4n}(0) = 2; X_{4ny}(0) = 2; X_5(0) = 3; n_k = 6.$$

Тактика сторон:

$$\alpha_1 = 0, 1; \quad \alpha_2 = 0, 5; \quad \alpha_3 = 0, 2; \quad \alpha_4 = 0, 2;$$

$$\beta_1 = 0, 4; \quad \beta_2 = 0, 4; \quad \beta_3 = 0, 2.$$

Начальное приближение вектора управления ЛС ПВО вычисляется по полученному общему ряду ранжирования на момент начала взаимодействия (см. табл. 3), исходя из имеющихся активных объектов ЛС ПВО. Таким образом,

$$\nu_{41}^0 = 0, 5; \quad \nu_{42}^0 = 0, 5; \quad \nu_{43}^0 = 0.$$

В качестве интервалов коррекции выбирается

$$\nu_{4i}^0 - 2h_{ПВО} \leq \nu_{4i} \leq \nu_{4i}^0 + 2h_{ПВО} \quad (0 \leq \nu_{4i} \leq 1),$$

где $h_{ПВО} = 1/X_{4p}(0)$.

При оптимизации на области показателей (рис. 4) получено стабильно-эффективное решение на основе СТЭК-7 (точка УКУ–Шепли).

На рис. 5 показано расположение различных решений на области значений показателей: точка A — исходное решение без учета управления насыщением ЛС ВБ, полученное путем применения процедуры ранжирования целей; точка B — решение без учета прогноза, но с возможным прогнозированием насыщения ЛС ВБ в процессе конфликта (построение на основе оптимальных действий ЛС ВБ) — можно рассматривать как реализацию угрозы стороной ЛС ПВО относительно

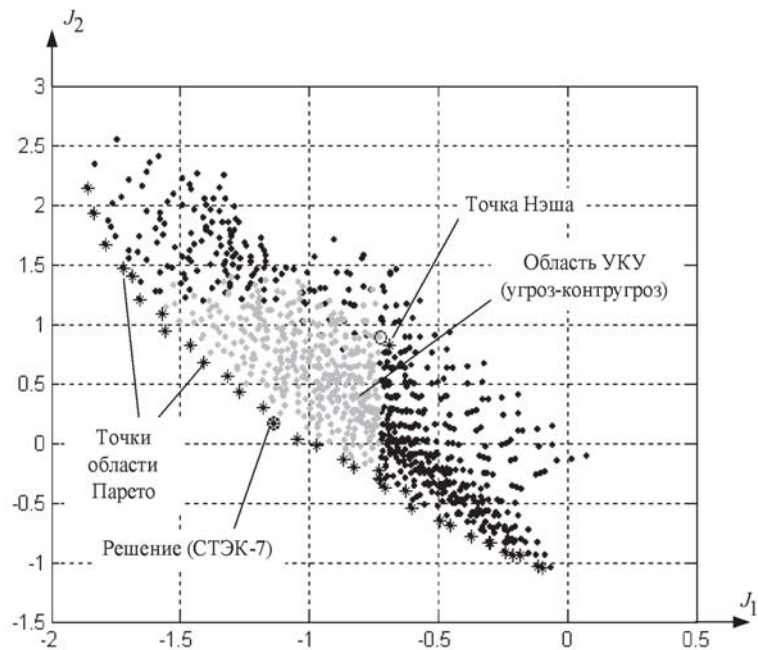


Рис. 4. Область значений показателей с указанием областей стабильных и эффективных решений

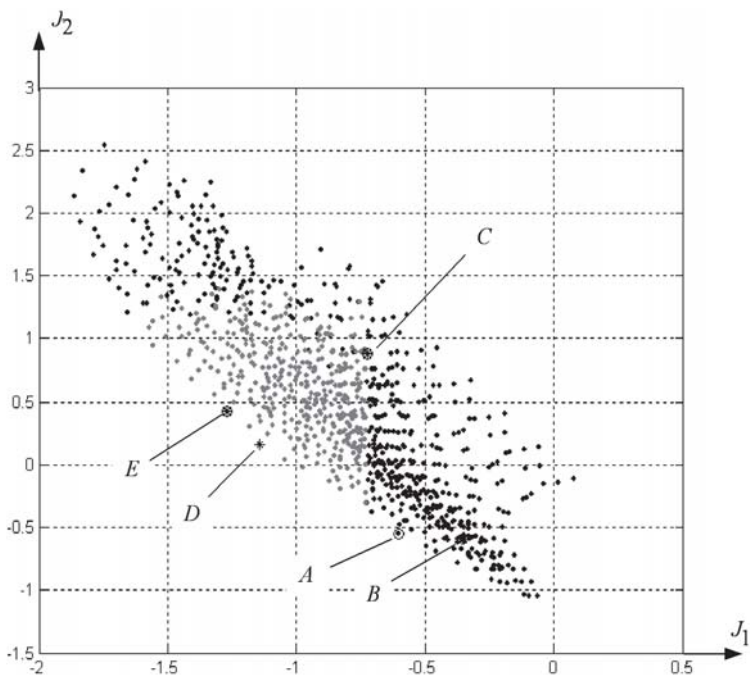


Рис. 5. Область значений показателей с указанием эффективных решений без учета и с учетом прогноза динамики конфликта

оптимального решения СТЭК-7; точка C — стабильное Нэш-решение; точка D — решение, полученное с учетом прогноза динамики конфликта, где учитывались конфигурация, переход пассивных средств ЛС ВБ в активные, тактика обеих сторон, а также возможность управления насыщением ЛС ВБ в процессе развития конфликта (точка СТЭК-7 — наиболее близкое УКУ-решение к утопической точке дележа по Шепли); точка E — итерационное решение, полученное путем повторных запусков алгоритма конфликтно-оптимального прогноза с начальными условиями на основе рассчитанного предыдущего оптимального управления (рассматривалась работа алгоритма с двумя итерациями).

Численные данные для каждого решения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Анализ вариантов решения задачи ЦР-ПДК

Точки	$\nu_{43} = 1 - \nu_{41} - \nu_{42}$				ЛС ВБ			ЛС ПВО		ВБ	ПВО
	ЛС ВБ		ЛС ПВО		$x_1(0)$	$x_2(0)$	$x_3(0)$	$x_4(0)$	$x_5(0)$		
	ν_{14}	ν_{25}	ν_{41}	ν_{42}	8	6	6 (2)	4 (12)	3		
	$x_1(T)$	$x_2(T)$	$x_3(T)$	$x_4(T)$	$x_5(T)$	J_1	J_2				
A	1	1	0,500	0,500	7,668	1,854	6	2,675	2,686	-0,353	-0,594
C	1,750	1,833	0,500	0,333	9,668	8,236	4,661	2,329	1,606	-0,724	0,885
D	1,500	1,000	0,416	0,583	12,391	1,164	6	1,859	2,803	-1,141	0,161
E	1,500	1,167	0,417	0,583	12,391	2,164	6	1,859	2,634	-1,271	0,422
B	1,500	1,000	0,500	0,500	11,668	1,855	6	1,984	2,686	-0,601	-0,551

Таким образом, по результатам исследования конфликтной ситуации можно сделать следующие выводы:

1. При учете прогноза динамики конфликта в процессе взаимодействия ЛС ВБ и ЛС ПВО происходит коррекция первоначального вектора управления с дополнительным учетом тех факторов, которые не были учтены при применении процедуры модифицированного ранжирования целей.

2. Точка Нэша характеризует стабильное решение, отклонение от которого влечет за собой ухудшение показателя качества отклоняющейся системы, вследствие чего данное решение может быть принято за основное приближение для получения эффективного решения. Данное решение (точка C) естественно лучше для ЛС ВБ и хуже для ЛС ПВО относительно точки A , так как изначально ЛС ВБ была поставлена в невыгодные для нее условия, а ЛС ПВО реализовала свое управление без просчета возможных действий ЛС ВБ (реализация угрозы со стороны ЛС ПВО).

3. Решение в точке Нэша с обоюдного согласия обеих систем может быть улучшено на основе приближения к точке дележа по Шепли. При

этом данное эффективное решение будет располагаться на Парето-границе области угроз-контругроз, при этом отклонение от данной точки (точка D) может быть наказано противоположной стороной. Решение на основе применения только алгоритма ранжирования целей (исходное управление) будет являться угрозой ЛС ПВО для ЛС ВБ, и ЛС ВБ может выбрать решение, которое будет выгодно для нее и хуже для ЛС ПВО относительно точки СТЭК-7.

4. Если принять во внимание действия по возможному отклонению одной из сторон от точки СТЭК-7, то необходимо рассмотреть два варианта: либо каждая из сторон будет выбирать на области точек УКУ оптимальное для нее решение, либо реализовывать контругрозу на действия противоположной стороны. В первом случае происходит заикливание алгоритма выбора оптимального решения, так как невозможно будет прийти к конкретному решению, которое в определенной степени устроило бы обе стороны конфликта. Во втором случае происходит последовательное движение к точке Нэша, что является ухудшением по показателям для обеих систем относительно предлагаемого компромисса в точке СТЭК-7.

5. Если применить управление ресурсами со стороны ЛС ПВО, полученное с учетом прогноза, для ситуации, когда ЛС ВБ не реализует свое управление по увеличению мощности активных средств, то решение для ЛС ПВО будет более эффективно, что естественно. Если же применить управление, полученное без учета прогноза на существующий начальный момент ЛС ВБ, то при наличии управления мощностью ЛС ВБ по активным средствам имеет место ухудшение показателя ЛС ПВО и улучшение показателя ЛС ВБ.

6. При анализе средних численностей объектов обеих ЛС после окончания взаимодействия, полученных в результате решения задачи прогноза, и результатов исследовательского имитационного моделирования взаимодействия, результат моделирования практически повторяет результат прогноза для стороны ЛС ПВО, при котором происходит частичное воздействие ЛС ВБ на объекты ЛС ПВО. Для численностей, полученных по математической модели динамики средних, можно сделать вывод, что решение на основе прогноза динамики конфликта будет лучше исходного на основе ранжирования целей для ЛС ПВО, если сравнивать их относительно суммы численностей объектов обеих систем (несмотря на то, что улучшение по численности для каждого из типов объектов может не наблюдаться).

Имитационная модель конфликта. При оценке эффективности полученного модифицированного алгоритма распределения ресурсов ЛС ПВО с элементами конфликтно-оптимального прогноза на первом

такте взаимодействия необходимо промоделировать полученные оптимальные управления применительно к рассматриваемой конфигурации ЛС ВБ. Для этих целей разработана и реализована имитационно-исследовательская модель со следующими допущениями:

1) в качестве простейшей модели налета используется прямолинейное равномерное движение объектов ЛС ВБ в сторону ЛС ПВО с вектором скорости, направленным в точку расположения ЛС ПВО;

2) каждый объект ЛС ВБ должен иметь возможность быть обслуженным со стороны ЛС ПВО как минимум 2 раза;

3) реализация проведена для одного комплекса, находящегося на корабле.

Представленная модель реализует следующие возможности по имитации конфликтной ситуации:

1) формирование конфигурации ЛС ВБ случайным образом на основе задания возможных интервалов нахождения того или иного типа объекта ВБ в области воздушного пространства и численности групп объектов каждого из рассматриваемых типов;

2) разделение пусков со стороны ЛС ПВО по времени согласно варьируемому параметру интервала между двумя соседними пусками — время перезарядки комплекса $T_{\text{пуск ПВО}}$; возможность изменения канальности комплекса ПВО для оценки возможного взаимодействия при насыщенном налете ЛС ВБ;

3) динамическое ранжирование в каждый момент времени и выбор наиболее важного объекта на конкретный момент пуска;

4) полное соответствие начальному вектору управления, полученному на этапе прогноза динамики конфликта, при назначении свободных каналов на момент начала взаимодействия;

5) динамический учет вероятности поражения согласно текущему положению объекта в общей конфигурации ЛС ВБ на момент пуска;

6) реализация насыщения налета в процессе взаимодействия согласно полученным параметрам управления мощностью ЛС ВБ на этапе прогноза динамики конфликта — случайная генерация параметров объектов и времени их обнаружения;

7) реализация случайного промаха по объекту ЛС ВБ согласно вероятности воздействия на него: используется равномерный закон распределения вероятности;

8) составление временной диаграммы событий, происходящих в каждый момент времени (пуск, взаимодействие, обнаружение и др.);

9) возможность реализации взаимодействия нескольких различных комплексов ЛС ПВО с ЛС ВБ.

В дальнейшем предусматривается расширение моделирования с реализацией реальных траекторий объектов ЛС ВБ.

Наглядность имитационного взаимодействия обеспечивается соответствующей картиной полета объектов обеих групп по траекториям во временном диапазоне конфликта с указанием точек встречи объектов и определенной цветовой гаммы для разделения типов объектов в общей группе. Пример взаимодействия представлен на рис. 6, 7.

Таким образом, в дополнение к результатам оптимизации можно сделать вывод, что, согласно оставшимся численностям ЛС ПВО, при взаимодействии действительно происходит воздействие на одну станцию наведения (либо целеуказания) и корабль может получить одну пробоину (что отражено в данных по взаимодействию ЛС ВБ и ЛС ПВО).

Анализ эффективности взаимодействия также можно проводить по другим параметрам: например, нагрузке на комплекс во время взаимодействия; общему времени, затраченному на взаимодействие; влиянию начальной численности ЛС ВБ, а также различному насыщению ЛС ПВО в процессе развития конфликта.

Таким образом, результатом данной работы являются построение и реализация алгоритма управления ресурсами ЛС ПВО, пример расчета по отдельным этапам алгоритма. Показано влияние конфликтно-

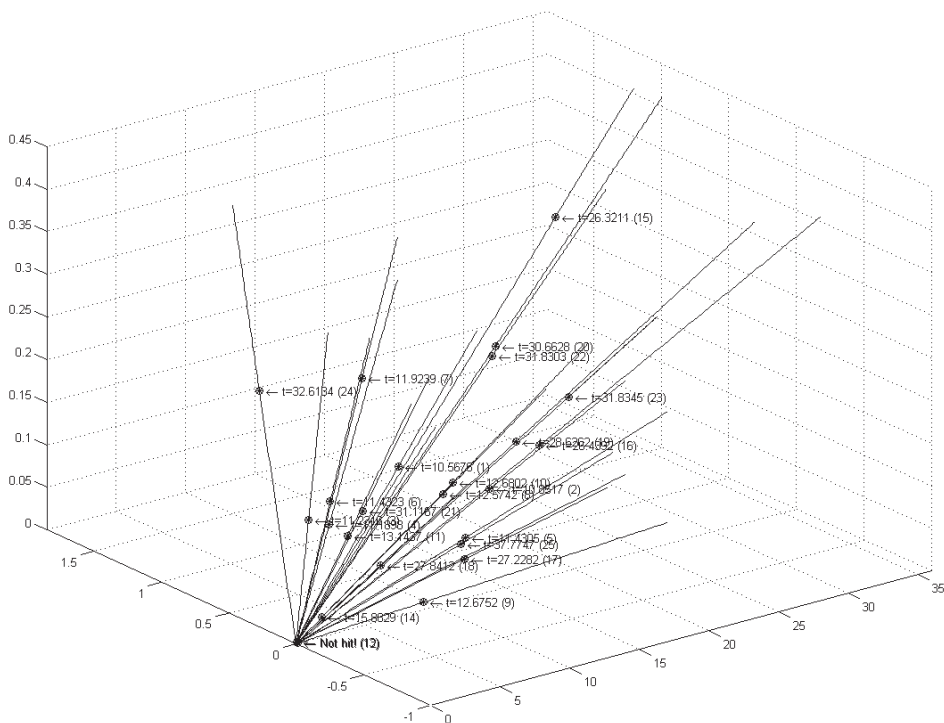


Рис. 6. Общая пространственная картина взаимодействия

T = 12.80 с. Ракета #16 запущена по цели #18
 T = 12.68 с. Ракета достигла цели #10 на расстоянии 5.8584 км
 T = 12.68 с. Ракета достигла цели #11 на расстоянии 11.2802 км
 T = 13.14 с. Ракета достигла цели #13 на расстоянии 8.1437 км
 T = 13.40 с. Ракета #17 запущена по цели #16
 T = 13.49 с. Ракета достигла цели #14 на расстоянии 0.093724 км. Цель не поражена
 T = 13.80 с. Опасность! Цель #14 типа 1 поразила ПВО! Корабль получил пробоину. Всего попаданий - 1
 T = 14.00 с. Ракета #18 запущена по цели #03
 T = 13.87 с. Ракета достигла цели #07 на расстоянии 0.073198 км. Цель не поражена
 T = 14.20 с. Опасность! Цель #07 типа 2 поразила ПВО! Поражена станция наведения. Всего попаданий - 1
 T = 15.88 с. Ракета достигла цели #03 на расстоянии 1.8829 км
 T = 17.40 с. Обнаружена новая цель! Тип цели - 1; дальность - 17.7495 км; скорость - 0.80986 км/с.
 T = 17.60 с. Ракета #19 запущена по цели #21
 T = 18.80 с. Обнаружена новая цель! Тип цели - 1; дальность - 18.1815 км; скорость - 0.98909 км/с.
 T = 18.80 с. Ракета #20 запущена по цели #22
 T = 21.60 с. Обнаружена новая цель! Тип цели - 1; дальность - 18.5281 км; скорость - 0.948 км/с.
 T = 21.80 с. Ракета #21 запущена по цели #23
 T = 24.80 с. Обнаружена новая цель! Тип цели - 2; дальность - 13.5083 км; скорость - 0.71068 км/с.
 T = 24.80 с. Ракета #22 запущена по цели #24
 T = 26.32 с. Ракета достигла цели #20 на расстоянии 26.1211 км
 T = 26.44 с. Ракета достигла цели #16 на расстоянии 13.0392 км
 T = 27.23 с. Ракета достигла цели #21 на расстоянии 9.6282 км
 T = 27.84 с. Ракета достигла цели #22 на расстоянии 9.0412 км
 T = 28.40 с. Обнаружена новая цель! Тип цели - 1; дальность - 18.0176 км; скорость - 0.90268 км/с.
 T = 28.40 с. Ракета #23 запущена по цели #25
 T = 28.63 с. Ракета достигла цели #18 на расстоянии 15.8262 км
 T = 30.66 с. Ракета достигла цели #17 на расстоянии 19.6628 км

Рис. 7. Участок временной диаграммы взаимодействия систем

оптимального прогноза на коррекцию управления с учетом дополнительных факторов, не учитываемых при решении задачи целеранжирования объектов ЛС ВБ, показана эффективность данной коррекции с учетом возможной тактики обеих систем. Результаты оптимизации также подтверждены имитацией взаимодействия систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов Е. М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 576 с.
2. Плотников В. Н., Зверев В. Ю. Принятие решений в системах управления. Ч.1. Теория и проектирование алгоритмов принятия оперативных решений. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – 172 с.
3. Преснухин Л. Н., Соломонов Л. А. Основы теории и проектирования вычислительных приборов и машин управления. – М.: Высшая школа, 1970.
4. Воронов Е. М., Репкин А. Л., Сидоров М. В. Распределение ресурсов ММС на основе модифицированных стабильно-эффективных решений // Труды V Международ. симп. “Интеллектуальные системы”: Тез. док. – Калуга, 2002. – С.186–188.
5. Воронов Е. М., Сидоров М. В. Четырехэтапный алгоритм динамического распределения ресурсов в конфликтной ситуации взаимодействия летательных аппаратов // Информационные технологии. – 2002. – № 9.
6. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2000.

Статья поступила в редакцию 4.10.2005

Аркадий Васильевич Борзунов родился в 1955 г., окончил в 1978 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, главный конструктор направления ОАО “МНИИРЭ “Альтаир”. Автор 47 научных работ в области систем управления летательных аппаратов.

A.V. Borzunov (b. 1955) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. Ph. D. (Eng.), senior researcher, chief designer of open stock-company “MNIIRE “Altair”. Author of 47 publications in the field of control systems for flying vehicles.

Евгений Михайлович Воронов 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 150 научных работ в области теории управления, систем управления и ее приложений.

Ye. M. Voronov (b. 1940) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1963 and the Lomonosov Moscow State University in 1969. D. Sc. (Eng.), professor of “Systems of Automatic Control” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 150 publications in the field of theory of control, systems of control.

Алексей Леонидович Репкин родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана (Калужский филиал). Аспирант кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 научных работ в области теории управления.

A.L Repkin (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Post-graduate of “Systems of Automatic Control” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 publications in the field of theory of control.

Надежда Сергеевна Трушина родилась в 1974 г., окончила в 1998 г. Московский государственный педагогический университет им. В.И. Ленина. Начальник сектора ОАО “МНИИРЭ “Альтаир”. Автор 2 научных работ в области теории управления.

N.S. Trushina (b. 1974) graduated from the Moscow State Pedagogical University n.a. V.I. Lenin in 1998. Head of department of open stock-company “MNIIRE “Altair”. Author of 2 publications in the field of theory of control.

Дмитрий Иванович Чеглаков родился в 1984 г., студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области систем управления летательными аппаратами.

D.I. Cheglakov (b. 1984) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of the control systems of the aircraft.