

УДК 004.023

Д.А. Пархоменко

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Украина

## МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИЕЙ

Предложен подход к автоматизированному решению задачи определения маршрута полета к цели ударной авиации. Для решения задачи автоматизированного определения маршрутов предлагается использовать математический аппарат теории графов, теории принятия решений и метод анализа иерархий. Использование данного метода возможно при разработке средств автоматизации определения маршрута в перспективных комплексах средств автоматизации пунктов управления авиацией.

**Ключевые слова:** управление полетом, определение маршрута, маршрут, управление воздушным движением, метод анализа иерархий.

### Введение

**Постановка проблемы.** Современные тенденции вооруженной борьбы, которые формируют характер военных действий, требуют дальнейшего качественного развития возможностей комплекса средств автоматизации пунктов управления авиацией [1]. Одной из таких возможностей является автоматизация определения маршрута полета к цели ударной авиации в реальном масштабе времени, что является актуальной научной задачей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Автоматизированное определение маршрутов в современных комплексах средств автоматизации пунктов управления авиацией не реализовано. В настоящее время задача построения опорной траектории, как правило, выполняется на основе известной карты рельефа местности (в том числе цифровой) с использованием различных подходов: от ручного определения оператором (штурманом) контрольных точек маршрута до широкого спектра математических подходов. Это и использование различных переборных методов, методов теории оптимизации, градиентных методов, нейронных сетей и генетических алгоритмов [2 – 6]. Однако указанные подходы для решения задачи ограничены в возможностях реализации. Это определяет необходимость и актуальность решения задачи прокладки маршрутов для ударной авиации в процессе непосредственного планирования ударов по наземным целям.

**Цель статьи:** разработка метода автоматизации определения рационального маршрута полета ударной авиации к цели в пространстве, содержащем ограниченные для полета зоны, в условиях дефицита времени.

### Изложение основного материала исследования

С помощью подхода, изложенного в [7], возможно рассчитать маршрут полета подразделения

ударной авиации к цели. Полет летательного аппарата описывается при помощи взвешенного ориентированного графа  $GR(V, E)$ , где  $V$  — множество вершин графа, равное количеству элементов пространства поиска, умноженному на количество дискретных направлений полета (каждая вершина соответствует элементу пространства поиска, достигнутому с определенным курсом);  $E$  — множество ребер графа (из каждой вершины исходят ориентированные ребра, соединяющие ее со смежными вершинами, которые соответствуют девяти соседним фронтальным по курсу элементам пространства, не выходящими за пространство поиска маршрута). Вес ребра равен количеству топлива, необходимому для достижения соседнего элемента с выбранным курсом, умноженному на соответствующий штрафной коэффициент из массива  $G$ , являющегося характеристикой пространства поиска маршрута. Размер  $G$  равен количеству элементов пространства. Значения, которые может принимать элемент массива: бесконечно большое число — для элементов пространства, запрещенных для пролета, штраф (число больше 1) — для элементов, не желательных для пролета (зоны действия средств ЗРВ, РТВ), 1 — для остальных элементов пространства. Каждый штраф отражает степень опасности элемента пространства.

Задача поиска опорной траектории сводится к поиску кратчайшего пути между двумя узлами графа  $GR(V, E)$ .

Лицо, принимающее решение (ЛПР), выбирает стратегии выполнения задачи, соответствующие оперативной обстановке, которые определяют исходные данные расчета маршрута. Например:

- стратегия обеспечение максимального боевого снаряжения авиационными средствами поражения — маршрут с минимальными затратами топлива (ПВО преодолевается за счет групп сопровождения);

- обеспечение минимального времени выполнения боевой задачи — маршрут с максимальной скоростью ЛА;

- обеспечение максимальной скрытности – элементам пространства, попадающим в зону действия средств РТВ и ЗРВ противника, назначается одинаковый штраф, равный 10, (таким образом, цена прокладки маршрута через зону действия средств РТВ и ЗРВ противника равна цене 10-кратного перерасхода топлива);

- обеспечение максимальной безопасности – элементам пространства, попадающим в зону действия средств РТВ противника, назначается одинаковый штраф, равный 6; элементам пространства, попадающим в зону действия средств ЗРВ противника, назначается одинаковый штраф, равный 20;

- пренебрежение скрытностью – элементам пространства, попадающим в зону действия средств РТВ противника, не назначается штраф;

- другие стратегии.

Рассчитаем маршруты соответствующие выбранным стратегиям. Каждый рассчитанный маршрут обладает набором характеристик: расход топлива, боевое снаряжение авиационными средствами поражения, скрытность, безопасность, время выполнения боевой задачи и т.д. Перед ЛПР стоит проблема выбора из рассчитанных маршрутов одного, максимально соответствующего оперативной обстановке. Для решения этой задачи воспользуемся методом анализа иерархий.

На рис. 1 представлена схема метода выбора варианта маршрута полета подразделения ударной авиации к цели на основе анализа иерархий.

Метод анализа иерархий (МАИ) является систематической процедурой для иерархического представления элементов. Декомпозиция проблемы на составляющие и дальнейшая обработка последовательности суждений ЛПР по парным сравнениям позволяет выразить относительную степень взаимодействия элементов в иерархии. Затем эти суждения выражаются численно. Полученные значения являются оценками в шкале отношений и соответствуют жестким оценкам [8].

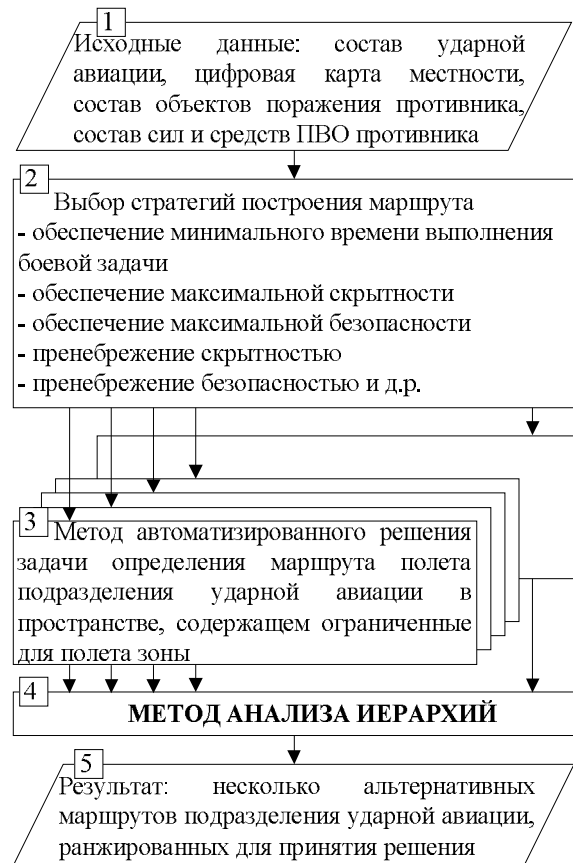


Рис. 1. Схема метода выбора варианта маршрута полета подразделения ударной авиации к цели на основе анализа иерархий

Рассмотрим содержание МАИ [9]:

1. Определение глобальной цели, синтез иерархии. Вершиной иерархии является главная цель; элементы нижнего уровня представляют множество вариантов достижения цели (альтернатив); элементы промежуточных уровней соответствуют критериям или факторам, которые связывают цель с альтернативами (рис. 2).

2. Построение множества матриц парных сравнений для каждого из нижних уровней иерархии

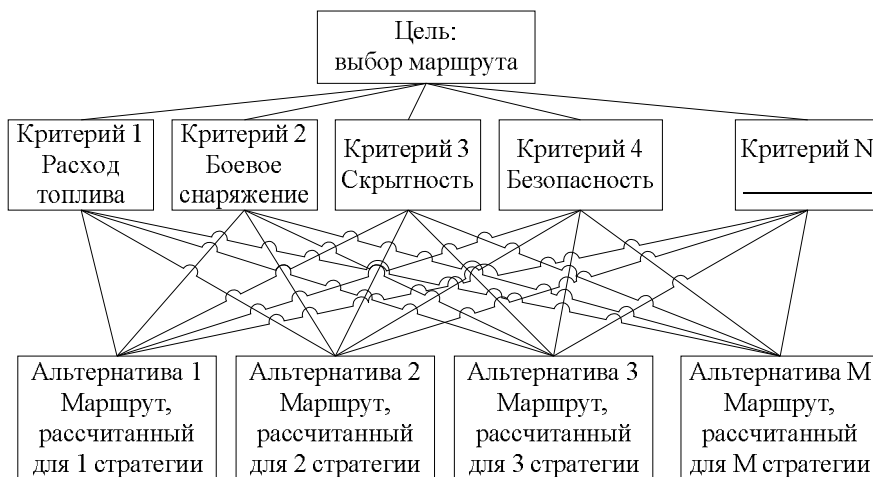


Рис. 2. Иерархическая структура МАИ

(для получения каждой матрицы необходимо  $\frac{n(n-1)}{2}$  суждений, где  $n$  – число сравниваемых элементов).

Матрица парных сравнений (1) представляет собой квадратную матрицу и имеет свойства обратной симметричности, т.е.  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ , где индексы  $i$  и  $j$  относятся к строке и столбцу соответственно.

$$\begin{matrix}
 & A_1 & A_2 & A_3 & A_n \\
 A_1 & \begin{pmatrix} \omega_1 & \omega_1 & \omega_1 & \omega_1 \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 & \omega_n \end{pmatrix} \\
 A_2 & \begin{pmatrix} \omega_2 & \omega_2 & \omega_2 & \omega_2 \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 & \omega_n \end{pmatrix} \\
 A_3 & \begin{pmatrix} \omega_3 & \omega_3 & \omega_3 & \omega_3 \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 & \omega_n \end{pmatrix} \\
 A_n & \begin{pmatrix} \omega_n & \omega_n & \omega_n & \omega_n \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 & \omega_n \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

Пусть  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  – множество из  $n$  элементов и  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$  – соответственно их веса или интенсивности. Сравним интенсивность каждого элемента с интенсивностью любого другого элемента множества по отношению к общей для них цели. Для сравнения весов «решим» квадратную обратносимметричную матрицу, т.е. количественно определим сравнительную важность факторов в проблемной ситуации. На факторах с наибольшими величинами важности будет сконцентрировано внимание при разработке плана действий.

Если  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$  неизвестны заранее, то попарные сравнения элементов производятся с использованием субъективных суждений, численно оцениваемых по шкале, а затем находятся компоненты  $\omega$ .

Когда задачи представлены иерархически, матрица составляется для сравнения относительной важности критериев на втором уровне по отношению к цели на первом уровне. Подобные матрицы должны быть построены для парных сравнений каждой альтернативы на третьем уровне по отношению к критериям второго уровня.

4. Определение согласованности. Индекс согласованности (ИС) дает информацию о степени нарушения численной (кардинальной  $a_{ij}a_{jk}$ ) и

транзитивной (порядковой) согласованности. Когда такие отклонения превышают установленные пределы, осуществляется их перепроверка в матрице.

Для получения индекса согласованности в каждой матрице и для всей иерархии вначале суммируется каждый столбец суждений, затем сумма первого столбца умножается на величину первой компоненты нормализованного вектора приоритетов, сумма второго столбца – на вторую компоненту и т.д. Затем полученные числа суммируются. Так получается величина  $\lambda_{max}$ . Для индекса согласованности имеем

$$\text{ИС} = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)},$$

где  $n$  – число сравниваемых элементов. Для обратно симметричной матрицы всегда  $\lambda_{max} \geq n$ .

Средние согласованности для случайных матриц разного порядка приведены в табл. 1.

Если разделить ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка, получим отношение согласованности (ОС). Величина ОС должна быть порядка 10% или менее, чтобы быть приемлемой. В некоторых случаях можно допустить 20%. Если ОС выходит из этих пределов, то участники должны проверить свои суждения.

5. Вычисление суммы по всем соответствующим взвешенным компонентам собственных векторов уровня иерархии, лежащего ниже. Из группы матриц парных сравнений формируем набор локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества элементов на элемент примыкающего сверху уровня. Для этого нужно вычислить множество собственных векторов для каждой матрицы, используя метод геометрического среднего: перемножая элементы в каждой строке и извлекая корни  $n$ -ой степени, где  $n$  – число элементов.

Полученный таким образом столбец чисел нормализуется делением каждого числа на сумму всех чисел.

$$x_j = \frac{\sqrt[n]{\omega_j \cdot \omega_j \cdot \omega_j \cdot \omega_j}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\omega_i \cdot \omega_i \cdot \omega_i \cdot \omega_i}}.$$

Таблица 1

Средние согласованности для случайных матриц разного порядка

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайная согласованность	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Умножаем матрицу парных сравнений на вектор приоритетов, получим:

$$Y_j = \frac{\omega_j}{\omega_1} \cdot x_1 + \frac{\omega_j}{\omega_2} \cdot x_2 + \frac{\omega_j}{\omega_3} \cdot x_3 + \frac{\omega_j}{\omega_n} \cdot x_n.$$

6. Нахождение согласованности всей иерархии путем перемножения каждого индекса согласованности на приоритет соответствующего критерия. Полученные числа суммируются, и результат делится на такое же выражение со случайным индексом согласованности, соответствующим размерам каждой взвешенной приоритетами матрицы.

Таким образом, предложенный в работе [8] метод является основой расстановки приоритетов вариантов решений, синтезированных в процессе принятия решения ЛПР.

## Выводы

Рассмотрена проблема автоматизации определения маршрута полета к цели ударной авиации.

Предложен подход к выбору штрафов для метода автоматизированного решения задачи определения маршрута полета подразделения ударной авиации в пространстве, содержащем ограниченные для полета зоны.

Для решения задачи выбора варианта маршрута полета подразделения ударной авиации к цели предлагается использовать метод анализа иерархий.

Предложенный метод возможно использовать при разработке средств автоматизации определения маршрута в перспективных комплексах средств автоматизации пунктов управления авиацией.

## МЕТОД АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ АВІАЦІЄЮ

Д.О. Пархоменко

*Запропоновано підхід до автоматизованого вирішення задачі визначення маршруту польоту до цілі ударної авіації. Для вирішення задачі автоматизованого визначення маршрутів пропонується використовувати математичний апарат теорії графів, теорії прийняття рішень і метод аналізу ієрархій. Використання даного методу можливо при розробці засобів автоматизації визначення маршруту в перспективних комплексах засобів автоматизації пунктів управління авіацією.*

**Ключові слова:** управління польотом, визначення маршруту, маршрут, управління повітряним рухом, метод аналізу ієрархій.

## METHOD ANALYSIS HIERARCHY FOR SOLVING APPLIED TASKS CONTROL OF AVIATION

D.A. Parkhomenko

*Offered approach to the automated decision of task determination of route of flight to the aim of shock aviation. For the decision of task of automation of determination of routes it is suggested to use the mathematical vehicle of theory of the graphs, theory of making decision and method of analysis of hierarchies. The use of this method is possible at development of facilities of automation of determination of route in the perspective complexes of facilities of automation of management points*

**Keywords:** flight control, the definition of the route, the route, air traffic control, method of analysis of hierarchies.

## Список литературы

1. Гурулев, С.П. Взгляды на развитие вооруженной борьбы, способы решения задач военной безопасности государства [Текст] / С.П. Гурулев // Армия. – 2008. – №3. – С. 5 – 8.
2. Patsko S, Botkin N.D., Turova V.I., Zarku M.A. Control of Aircraft Landing in Windshear // Journal of Optimization Theory and Applications. Vol. 83, Nov 1994.
3. Брюсов С.В. Метод оптимизации пространственной траектории полета в режиме огибания рельефа местности. // Авиакосмическое приборостроение. 2006. №2. С. 47 – 50.
4. Кирсанов А.П. ратом в горизонтальной плоскости при облете им неподвижной опасной зоны / А.П. Кирсанов, Д.Н. Сузанский // Радиотехника. – 2013. – №1. – С. 73-76.
5. Ларкин, Е.В. Метод трассировки движения мобильного робота по построению рельефа [Текст] / Е.В. Ларкин, Ву Зуй Нехиа // Журн. Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 7-2. – С. 136 – 140.
6. Леценко, С.П. Методика расчета оптимальной траектории пролета воздушных объектов по критерию минимума вероятности обнаружения [Текст] / С.П. Леценко, М.П. Батурицкий, Д.Ю. Свистунов // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС. 2005. – Вып. 2(42). – С 103-110.
7. Павленко М.А. Метод решения задачи автоматизации процесса выбора маршрута полета ударной авиации / М.А. Павленко, Д.А. Пархоменко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Вып. 2(15). – Х.: ХУПС, 2014. – С. 71–74.
8. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.

Поступила в редколлегию 28.08.2015

**Рецензент** д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Е.А. Украинцев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.