

УДК: 52-50

DOI: 10.53816/23061456_2021_11-12_102

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СМЕШАННОЙ ГРУППЫ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ
ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**SOLUTION OF A TASK OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF THE
FUNCTIONING OF A MIXED GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES
IN CONDITIONS OF INFORMATION AND TECHNICAL INFLUENCES**

Канд. техн. наук С.В. Иванов, С.А. Беседин

Ph.D. S.V. Ivanov, S.A. Besedin

Краснодарское высшее училище им. С.М. Штеменко

В работе рассматривается решение многокритериальной задачи нахождения вектора наиболее вероятных стратегий управления смешанной группой беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях выполнения ей разноплановых задач. Решение строится на использовании метода анализа иерархий, который позволяет в интерактивном режиме найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом согласуется с пониманием сути проблемы и требованиями к её решению. Построенная логическая модель принятия решения (ЛМПП) учитывает полный вектор возможных неблагоприятных факторов (угроз), действующих на комплекс с БЛА и особенности применения группы БЛА в реальных условиях обстановки. Разработанная ЛМПП позволит пункту управления группой БЛА, размещенному на борту ведущего БЛА, оперативно принимать решения по рациональному распределению имеющихся ресурсов для решения разноплановых задач по предназначению.

Ключевые слова: смешанная группа БЛА, многокритериальная задача, система поддержки принятия решения, метод анализа иерархий, цель, альтернатива, критерий.

The paper considers the solution of the multicriteria problem of finding the vector of the most probable control strategies for a mixed group of unmanned aerial vehicles (UAV) in the conditions of its implementation of diverse tasks. The solution is based on the use of the hierarchy analysis method, which allows you to interactively find such a variant (alternative) that best matches the understanding of the essence of the problem and the requirements for its solution. The constructed logical decision-making model (LDMM) takes into account the full vector of possible unfavorable factors (threats) acting on the complex with UAVs and the peculiarities of using a group of UAVs in real conditions. The developed LDMM will allow the control center of the UAV group, located on board the leading UAV, to promptly make decisions on the rational distribution of available resources for solving diverse tasks for their intended purpose.

Keywords: mixed UAV group, a multicriteria task, decision support system, hierarchy analysis method, goal, alternative, criterion.

При построении ЛМПР робототехнического комплекса (РТК) с БЛА исследователь сталкивается с большим объемом входных данных, которые необходимо правильно согласовать между собой, описать их физическую природу и обобщить логику дальнейшей работы с ними, используя логический вывод.

В качестве лица принимающего решение (ЛПР) в работе предлагается использовать одного из участников группового взаимодействия — «ведомый» БЛА, являющийся лидером в группе, и отдающий команды (указания) всем участникам группы.

Зная весь вектор исходных данных о состоянии комплекса и окружающей среды в условиях быстроменяющейся обстановки и противодействия противника, большого количества неопределенных факторов, действующих на РТК, возникает задача поиска альтернатив принятия решения смешанной группой БЛА.

В итоге, сравниваются выбираемые действия (альтернативы) с каждым критерием, составляются веса и формируется результат с высшим приоритетом.

Цель работы — построение ЛМПР, реализованной в виде алгоритмического обеспечения, размещенного в бортовой системе управления «ведущего» БЛА, позволяющей обеспечить распределение функций между каждым участником группового движения в полном соответствии с целевой установкой и адаптироваться к быстрым изменениям внешней среды.

В работе ставится задача построить модель угроз вероятного противника, которая позволит адекватно соотнести конкретный тип БЛА с конкретным видом угрозы, действующей на РТК и оптимально распределить всех участников смешанной группы БЛА по функциональному признаку и физическим возможностям каждого участника в условиях информационно-технических воздействий, неблагоприятных погодных условий и ограниченного количества ресурсов.

Рассматриваемая задача может быть сформулирована следующим образом.

Пусть: $H = R, L_i, h_0, w_{h_i}, \theta$ — множество всех целей или иерархия, на которой задано бинарное отношение строгого порядка, т.е. существует максимальный (конечный) элемент и такое разбиение элементов множества на подмножества $L_i, (i = \overline{1...n})$, элемент $h_i \in H$ принадлежит только

одному из подмножеств L_i , где R — множество БЛА (с известными летно-техническими характеристиками d с заданными начальным x_0, y_0 и конечным x_k, y_k местоположением в декартовой системе координат), состоящее из q одиночных БЛА $R_q, q = \overline{1, \dots, m}; L_i$ — множество уровней иерархии; h_0 — множество вершин иерархии (показателей, критериев); w_{h_i} — множество весов (приоритетов) элементов x относительно h ; θ — множество информационно-технических воздействий на группу БЛА $\theta_f, f = \overline{1, \dots, v}$.

Требуется: рассмотреть все возможные угрозы $\theta_f, \theta, f = \overline{1, \dots, v}$, найти соответствие конкретного типа БЛА, исходя из его физических возможностей, соответствующему типу воздействия (угрозы), провести попарное сравнение разработанных критериев h_0 , найти отношения между весами критериев и суждениями d и построить логическую модель работы системы поддержки принятия решений (СППР) смешанной группы БЛА.

Ввиду того, что в работе рассматривается смешанная группа БЛА (разведывательные и ударные) с различными массогабаритными показателями, физическими и функциональными возможностями возникает необходимость осуществлять разбиение ее на подгруппы для эффективного решения разноплановых задач по предназначению.

Для этого вся смешанная группа БЛА разбивается на три группы кластеров по типам БЛА и по их функциональному назначению. Разбиение группы проводится в соответствии с классификацией, предложенной в [1]. К первой группе относятся легкие БЛА, ко второй группе — средние БЛА, а к третьей — тяжелые БЛА.

Вся смешанная группа БЛА состоит из трех подгрупп: БЛА 1 подгруппы — «Легкие» с радиусом действия (50–100 км); БЛА 2 подгруппы — «Средние» (200–500 км) и БЛА 3 подгруппы — «Тяжелые» (500–1500 км) [2, 9].

Наиболее эффективными информационно-техническими воздействиями в настоящее время представляются огневое поражение, радиоэлектронное подавление и функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями [2, 3].

В статье предлагается использование метода многокритериальной оптимизации с целью определения наиболее предпочтительного вари-

анта применения смешанной группы БЛА в условиях действия конкретного типа информационно-технического воздействия на соответствующую подгруппу БЛА, обладающего весовым приоритетом и являющегося наиболее предпочтительным [4]. Идея заключается в построении матриц попарных сравнений для показателей, включенных в различные группы по смыслу [3].

Способ упорядочения объектов по набору признаков предполагает нахождение нормированного к единице собственного вектора ω заданной матрицы попарных сравнений посредством решения уравнения:

$$(\mathbf{A} - \lambda_{\max} \mathbf{I})\omega = 0,$$

где λ_{\max} — максимальное собственное число матрицы \mathbf{A} (матрицы отношений весов признаков (критериев)).

Однако определение λ_{\max} посредством решения характеристического уравнения: $\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = 0$ (т.е. составления характеристического многочлена степени « n » и решения его относительно λ) — достаточно трудоёмкая задача (число слагаемых (одночленов) определителя = $n!$, степень характеристического многочлена = n).

Имеются способы приближённого вычисления собственных векторов. Один из наилучших путей — геометрическое среднее (перемножаются элементы в каждой строке матрицы порядка « n » и извлекаются корни n -ой степени).

Распределение возможных угроз по соответствующим БЛА группы осуществляется в соответствии с табл. 1 [1].

Задача состоит в выборе одного из трёх вариантов, алгоритм ее решения включает 5 этапов.

Этап 1. Декомпозиция задачи в иерархию: первый уровень — цель исследования; второй уровень — критерии оптимизации; третий уровень — варианты группировки критериев оптимизации. Иерархия удовлетворения выбранным критериям представлена на рис. 1.

Этап 2. Составление матрицы попарных сравнений критериев оптимизации. Попарные сравнения производятся с использованием субъективных суждений, численно оцениваемых по шкале относительной важности (табл. 2).

По табл. 2, на основании субъективных оценок того или иного критерия составляется мат-

рица попарных сравнений критериев оптимизации для БЛА 1–3 подгрупп.

В результате данного попарного сравнения формируется матрица $\mathbf{D} = [d_{ij}]$ порядка m . Данная матрица для вектора приоритета элемента нижнего уровня относительно элемента верхнего уровня $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ представляется в виде [6]:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_m} \\ w_1 & w_2 & \dots & w_m \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_m} \\ w_1 & w_2 & \dots & w_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_m}{w_1} & \frac{w_m}{w_2} & \dots & \frac{w_m}{w_m} \\ w_1 & w_2 & \dots & w_m \end{pmatrix}.$$

Этап 3. Приближённое определение λ_{\max} матрицы попарных сравнений критериев оптимизации.

Для обратно-симметричной матрицы всегда $\lambda_{\max} \geq m$. Слишком сильное отличие λ_{\max} от m говорит о некоторой внутренней несогласованности оценок экспертом элементов матрицы попарных сравнений и необходимости их пересмотра.

Этап 4. Определение индекса согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС).

Значения CIS для различных значений размерностей матрицы \mathbf{D} приведены в табл. 3.

В качестве показателя меры согласованности используются индекс согласованности (consistency index — CI) и отношение согласованности (consistency ratio — CR) [6]

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1};$$

$$CR = \frac{CI}{CIS}.$$

CIS — среднее значение индекса согласованности как случайной величины, полученное экспериментально в результате обработки большого количества сгенерированных случайным образом матриц попарных сравнений. Согласованность матрицы попарных сравнений при $m \geq 5$ рекомендуется считать приемлемой, если значение от-

Распределение угроз по типам БЛА

Тип воздействия	Малые БЛА	Средние БЛА	Тяжелые БЛА
Артиллерийское поражение	+	+	-
Ракетное поражение	-	+	+
Заградительная шумовая помеха (белый шум высокой мощности) во всем диапазоне частот	+	+	+
Узкополосная шумовая или гармоническая (одночастотное или модулированное гармоническое колебание) помеха, скользящая по диапазону частот	+	+	+
Шумовая помеха, прицельная по частоте линии связи	+	+	+
Гармоническая помеха, прицельная по частоте линии связи	+	+	+
Узкополосная шумовая или гармоническая помеха, скользящая по используемому диапазону частот (при использовании линий связи с ШПС или ППРЧ)	+	+	+
Имитирующая помеха, прицельная по частоте линии связи и структуре передаваемых сигналов (имитирует структуру сигналов линии связи)	+	+	+
Имитирующая помеха, прицельная по частоте и структуре сигнала, а также по структуре и формату передаваемых данных (имитирует ложные данные, передаваемые по линии связи), с целью навязывания ложных режимов работы	+	+	+
Функциональное поражение РЭС сверхвысокочастотным электромагнитным излучением	+	+	-
Функциональное поражение БЛА лазерным излучением	+	+	-
Использование специальных БЛА-перехватчиков	+	+	-
Использование горючих, вязких и специальных клейких аэрозолей	+	-	-
Использование сетей	+	-	-
Использование специально тренированных птиц	+	-	-

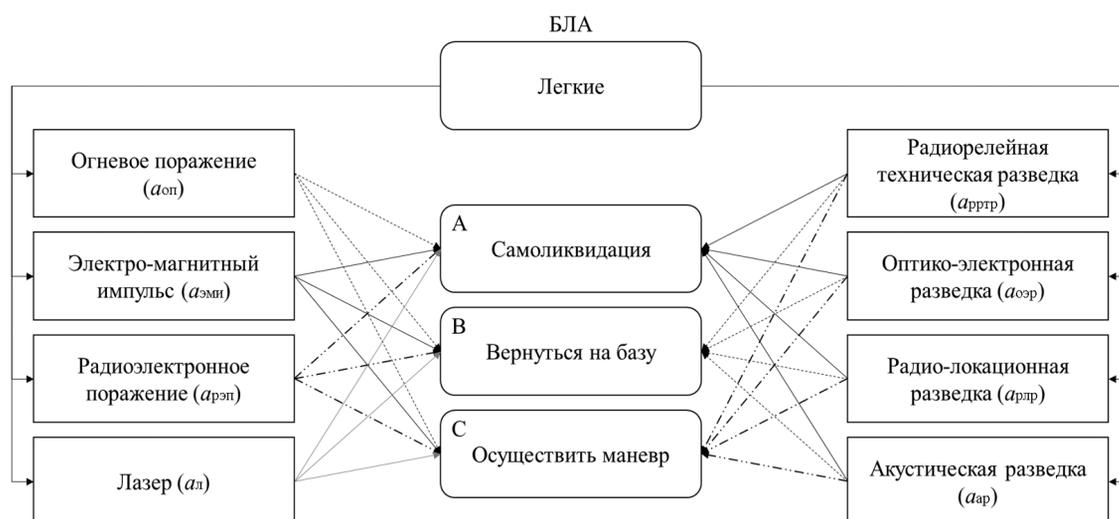


Рис. 1. Иерархия удовлетворения выбранным критериям

Таблица 2

Шкала относительной важности

№ п/п	Интенсивность относительной важности	Определение	Пояснения
1	2	3	4
1	1	Равная важность	Равный вклад двух критериев (видов деятельности) в цель
2	3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают лёгкое превосходство одному критерию над другим
3	5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения дают сильное превосходство одному критерию над другим
4	7	Значительное превосходство	Одному критерию даётся настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
5	9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одного критерия над другим подтверждается наиболее сильно
6	2, 4, 6, 8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями	Применяются в компромиссном случае
7	Обратные числа	Если при сравнении одного критерия с другим получено одно из вышеуказанных чисел, то при сравнении второго критерия с первым получится обратная величина	

Таблица 3

CIS для различных значений размерностей матрицы D

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CIS	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

ношения согласованности не превышает 0,1. Превышение данного порогового значения является поводом для пересмотра суждений [4, 8].

Этап 5. Составление матрицы попарных сравнений для каждого отдельного критерия оптимизации (на более низком уровне иерархии). На основе выбранных альтернатив попарных сравнений восьми различных критериев для

различных типов БЛА разработана программа, вычисляющая наиболее приоритетный вариант альтернативы. В работе определены следующие альтернативы: ОМ — осуществить маневр; СЛ — самоликвидироваться; ВБ — вернуться «на базу» (в пункт постоянной дислокации).

Диаграммы результата на основе матрицы попарных сравнений представлены на рис. 2.

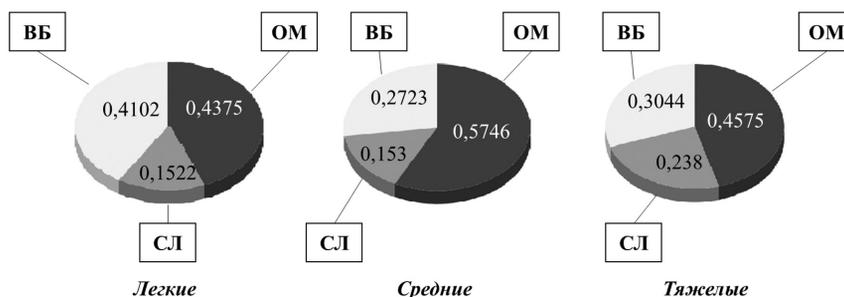


Рис. 2. Итоговые диаграммы в программе Mpriority

Заключение

Системный метод позволяет создать многомерную сверхтранзитивную матрицу попарных сравнений и разработать варианты принятия решений по выполнению разведывательно-ударных задач смешанной группой БЛА непосредственно в воздухе без участия человека-оператора.

Построенная модель позволяет адекватно осуществлять поиск альтернативного наилучшего решения в условиях действия угроз большой размерности в установленные нормативными документами кратчайшие сроки.

Полученные в ходе расчетов с помощью диалоговой программной системы «Mpriority 1.0» [7] результаты позволили определить приоритет каждого варианта выбранной альтернативы для легких БЛА: «ОМ» — (0,4375), «СЛ» — (0,1522), «ВБ» — (0,4102).

Таким образом, предлагаемый вариант системы «ОМ» («осуществить манёвр») обладает весовым приоритетом и является наиболее предпочтительным.

Полученная ЛМПП позволяет в режиме реального времени на борту «ведущего» БЛА осуществлять поиск наилучшего решения.

Проведенные исследования показали, что разработанное дерево решений может быть реализовано существующими и перспективными бортовыми спецвычислителями.

Литература

1. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 3. Радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 101–175. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10205.

2. Абросимов В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. — М.: «ИД Наука». 2013. 168 с. ISBN 978-5-9902335-8-4.

3. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2015. 305 с. ISBN 978-5-9221-1674-9.

4. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь. 1993. 278 с.

5. Щербатов И.А., Проталинский И.О., Проталинский О.М. Управление группой роботов: компонентный подход // Информатика и системы управления. 2015 № 1 (43). С. 93–104.

6. Программная система поддержки принятия решений «Mpriority 1.0»: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tomakechoice.com/paper/mpriority.pdf>

7. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. — М.: Радио и связь. 1991. 224 с.

8. Сенюшкин Н.С. и др. Особенности классификации БЛА самолетного типа // Молодой ученый. 2010. Т. 1. № 11. С. 65–68.

References

1. Makarenko S.I. Analiz sredstv i sposobov protivodejstviya bespilotnym letatel'nyh apparatam. CHast' 3. Radioelektronnoe podavlenie sistem navigacii i radiosvyazi // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2020. № 2. P. 101–175. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10205.

2. Abrosimov V.K. Gruppovoe dvizhenie intellektual'nyh letatel'nyh apparatov v antagonistscheskoj srede. — М.: «ID Nauka». 2013. 168 p. ISBN 978-5-9902335-8-4.

3. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami v neopredelennyh sredah / Pod red. V.H. Pshihopova. — М.: FIZMATLIT. 2015. 305 p. ISBN 978-5-9221-1674-9.

4. Saati T.L. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij. — М.: Radio i svyaz'. 1993. 278 p.

5. Shcherbatov I.A., Protalinskij I.O., Protalinskij O.M. Upravlenie gruppoj robotov: komponentnyj podhod // Informatika i sistemy upravleniya. 2015 № 1 (43). P. 93–104.

6. Programmnyaya sistema podderzhki prinyatiya reshenij «Mpriority 1.0»: [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.tomakechoice.com/paper/mpriority.pdf>

7. Saati T. Analiticheskoe planirovanie. Organizaciya sistem: per. s angl. — М.: Radio i svyaz'. 1991. 224p.

8. Senyushkin N.S. and others. Features of the classification of UAV aircraft type // Young scientist. 2010. Vol. 1. № 11. P. 65–68.