

УДК 681.324

Н.А. КОРОЛЮК

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХВАТА ИСТРЕБИТЕЛЯМИ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕСТОХАСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассматривается обоснование правил определения целесообразных параметров планируемого перехвата при нечетком описании прогнозируемой воздушной обстановки и действий воздушной цели противника.

параметры перехвата, нечеткое описание, нестохастическая неопределенность

Введение

Постановка проблемы. Ядро системы поддержки принятия решений составляет база знаний, которая определяет компетентность системы. Выдача рекомендации системой поддержки принятия решений о применении целесообразных параметров планируемого перехвата (способа сближения и дистанции выхода на воздушную цель (ВЦ), полусферы и высоты атаки) возможна после реализации логического вывода по информации, представленной в базе знаний в виде продукционных правил.

При определении параметров планируемого перехвата (ППП) истребителями ВЦ противника учитываются факторы, характеризующие ее действия и конкретную воздушную обстановку (ВО). Значения факторов (начальный курсовой угол истребителя, дальность обнаружения ВЦ, маневрирование курсом, высотой, и т.д.) прогнозируются.

В условиях нестохастической неопределенности значений факторов, имеющих качественную природу, прогнозирование может осуществляться только на постановке экспертизы и обработке экспертных данных. Если бы имелась статистика значений факторов, то задача прогнозирования значений могла быть поставлена и решена в условиях стохастической неопределенности. Сглаживание стохастических значений на момент времени $t_i < t_0, i = \overline{1, n}$,

может быть выполнено по методу наименьших квадратов при допущении принятой зависимости значений факторов от времени. Тогда задача прогнозирования на определенный промежуток времени состоит в экстраполяции полученных сглаженных значений. Такое определение прогнозируемых значений факторов предусматривает допущение, состоящее в том, что совокупность условий, которая определяла статистические значения факторов, остается неизменной на прогнозируемый период времени. При таком допущении в условиях высокой динамики и скоротечности изменения ВО при ведении боевых действий долгосрочное прогнозирование значений факторов не может считаться удовлетворительным. Тогда при отсутствии статистики прогнозирование значений факторов, характеризующих конкретную ВО и влияющих на параметры перехвата, следует рассматривать в условиях нестохастической неопределенности. Тогда возникает необходимость формирования продукционных правил определения целесообразных ППП по прогнозируемой ВО и действиях ВЦ противника в нечеткой постановке.

Анализ литературы. В [1-3] приведены необходимые данные, которые могут составить основную информацию для экспертов с целью прогнозирования основных значений факторов на момент времени принятия решений.

Определение целесообразной стратегии, включающей ППП, связано с постановкой и решением многокритериальной задачи оптимизации. В [4 – 6] рассмотрены вопросы, связанные с определением нечетких подмножеств, раскрыто содержание метода анализа иерархий для решения задач многокритериальной оптимизации. Анализ литературы подчеркивает актуальность проблемы и дает возможность сформулировать цель.

Цель статьи заключается в обосновании правил определения целесообразных ППП при нечетком описании прогнозируемой ВО и действий ВЦ противника.

Решение проблемы

Сравнительная оценка ППП связана с постановкой и решением многокритериальной задачи оптимизации. Известны методы решения задач многокритериальной оптимизации: определение основного критерия, формирование обобщенного критерия, анализа иерархий. Метод определения основного критерия заключается в том, что многокритериальная начальная задача сводится к однокритериальной задаче, которую формируют после получения ответа для задачи ранжирования критериев и определения ограничений для критериев. Метод последовательных поступков также требует решения задачи ранжирования критериев, определения величин поступков по каждому критерию. Метод анализа иерархий [4], с точки зрения его применения для решения многокритериальных задач оптимизации разной физической природы, недостатков не имеет. Более того, критерии могут соответствовать факторам количественной и качественной природы.

К основным факторам, от которых зависят ППП, относят: начальный курсовой угол истребителя, дальность обнаружения, маневр ВЦ курсом, дальность пуска управляемых ракет, находящихся на борту ВЦ, высота и маневр ВЦ высотой [3]. При рассмотрении ППП определенные выше факторы будут иметь прогнозируемые значения.

В условиях нестохастической неопределенности

прогнозирование значений факторов осуществляется путем организации экспертизы, при которой решается задача принятия решения (O_{α} , PO), где O_{α} – множество оценок значений факторов эксперта, OP – принцип оптимальности эксперта, определяющий наиболее точную оценку. Схема экспертизы учитывает наличие связи между экспертами, обратной связи, метода обработки экспертных знаний. С этой целью исследователь может предложить схему экспертизы, в которой каждый l -й эксперт высказывает субъективное суждение относительно прогнозируемого значения фактора в виде бинарного отношения предпочтения.

С целью определения по прогнозируемым значениям целесообразной стратегии, включающей ППП, в нечеткой постановке рассмотрим следующую возможную декомпозицию проблемы в иерархию, которая представлена на рис. 1.

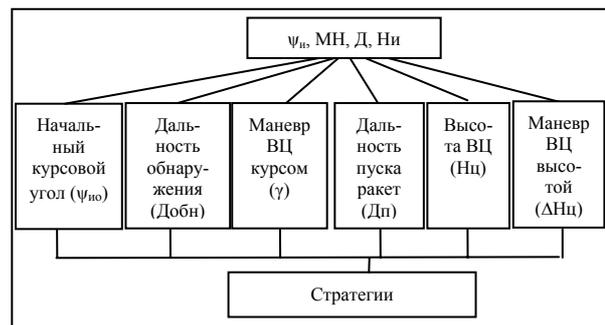


Рис. 1. Декомпозиция проблемы в иерархию

Как показано на рис. 1, декомпозиция проблемы в иерархию имеет три уровня: уровень первый соответствует цели, которая достигается при решении проблемы; уровень второй включает показатели (критерии), по которым должна приниматься та или иная альтернатива; уровень третий соответствует перечню стратегий, включающих ППП (например, курсовой угол истребителя $105^{\circ} - 180^{\circ}$, метод навигации – «Погоня с упреждением», дистанции выхода на воздушную цель 35 – 40 км, высота истребителя – превышение над ВЦ более 500 м). Таким образом, декомпозиция проблемы в иерархию отображает содержание многокритериальной задачи оптимизации, которая имеет особенность: нечеткое описа-

ние значений факторов (показателей), характеризующих прогнозируемую ВО и действия ВЦ противника. Приемлемым подходом прогнозирования факторов (показателей) в условиях нестохастической неопределенности является введение лингвистических переменных (ЛП). Согласно [5, 6] ЛП – это кортеж $\langle \beta, S(\beta), X, G, M \rangle$, где β – название ЛП; $S(\beta)$ – терм-множество ЛП β элементы которого $\alpha_i, i = \overline{1, n}$ суть наименование нечеткой переменной $\langle \alpha, X, \tilde{C}(\alpha) \rangle$ как лингвистических значений ЛП, где X – область определения нечеткой переменной, $\tilde{C}(\alpha_i) = \left\{ \mu_{\tilde{C}(\alpha_i)}(x) / x \right\}, x \in X, \mu_{\tilde{C}(\alpha_i)}(x)$ – значение функции принадлежности; G – синтаксическое правило, порождающее наименование переменной $\alpha \in S(\beta)$ как вербальных значений ЛП; M – синтаксическое правило, которое ставит в соответствие каждой переменной $\alpha \in S(\beta)$ нечеткое множество $\tilde{C}(\alpha)$.

Для прогнозирования значения начального курсового угла (ψ_{uo}) в условиях нестохастической неопределенности введем ЛП $\langle \beta, S(\beta), X, G, M \rangle$, где β – «начальный курсовой угол истребителя», термножество содержит $S(\beta) = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5)$, где β_1 – «очень малый» начальный курсовой угол, β_2 – «малый» начальный курсовой угол, β_3 – «не большой» начальный курсовой угол, β_4 – «средний» начальный курсовой угол, β_5 – «большой» начальный курсовой угол. Задача формирования области определения ЛП «начальный курсовой угол истребителя» решается с помощью постановки экспертизы и построения по результатам ее обработки эмпирической функции распределения. В результате экспертизы будут получены: пессимистические $\psi_{uo}^{(П)}$, наиболее ожидаемые $\psi_{uo}^{(H)}$ и оптимистические $\psi_{uo}^{(O)}$ оценки значений угла на момент обнаружения ВЦ. Тогда возможно сформировать область определения введенной ЛП вида

$$X = I^{(П)} \cup I^{(H)} \cup I^{(O)} = (3; 175).$$

Аналогичным образом определяются статистические функции распределения других показателей.

В целях определения нечетких множеств $\tilde{C}(\alpha_i), i = \overline{1, 5}$ нечеткой переменной α_i организуется экспертиза. Схема экспертизы предполагает участие 15 экспертов, эксперты независимы, обратная связь отсутствует, эксперты имеют одинаковый вес. Кроме того, схема организации экспертизы предполагает, что мнения экспертов относительно $\tilde{C}(\alpha_i) = \left\{ \mu_{\tilde{C}(\alpha_i)}(x) / x \right\}, x \in X, i = \overline{1, 5}$ будут выражены положительной, обратно симметричной и согласованной матрицей. Свои суждения эксперты представляют в виде матриц $A^{(l)}, l = \overline{1, 15}$, которые усредняются и далее рассматривается матрица $A = \left\| a_{ij} \right\|; i, j = \overline{1, n}$. Для всякой квадратной матрицы A , рассмотрение матричного уравнения $AY^T = \lambda Y$ позволяет определить соответствующие ей собственные числа $\lambda_q, q = \overline{1, G}$, как корни характеристического уравнения $A - \lambda E = 0$, где E – единичная матрица. Каждому собственному числу $\lambda_g, g = \overline{1, G}$ будет соответствовать собственный вектор $Y_g, g = \overline{1, G}$. Если матрица A положительная, обратносимметричная и согласованная:

$$a_{ij} > 0; a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}; a_{ik} = a_{ij} a_{jk}, i, j, k = \overline{1, n},$$

то уравнение $A - \lambda E = 0$ имеет единственное решение $\lambda = \lambda_{\max} = n$ и этому значению будет соответствовать единственный собственный вектор Y . Поэтому если субъективные мнения экспертов относительно $\tilde{C}(\alpha_i) = \left\{ \mu_{\tilde{C}(\alpha_i)}(x) / x \right\}, x \in X, i = \overline{1, n}$ будут выражены положительной, обратносимметричной, согласованной матрицей, то решение уравнения $AY^T = nY$ позволяет определить вектор $Y = \left\{ \mu_{\tilde{C}(\alpha_i)}(x) \right\}$, а мера совпадения λ_{\max} с n будет выступать мерой согласованности суждений экспер-

тов. Каждый эксперт высказывает суждение о том, во сколько раз значение функции принадлежности, например, значения α_1 нечеткой переменной α , $\mu_{C(\alpha_1)}(x_i)$ превосходит значение функции принадлежности $\mu_{C(\alpha_1)}(x_j)$, где $x_i, x_j \in X; i, j = \overline{1, n}$.

Свои суждения каждый l -й эксперт формирует на основании качественных оценок, которые позаимствованы из [4].

Если
$$a_{ij}^{(l)} = \frac{\mu_{C(\alpha_j)}(x_i)}{\mu_{C(\alpha_j)}(x_j)}, \quad a_{ij}^{(l)} = \frac{1}{a_{ij}^{(l)}}$$

$$a_{ik}^{(l)} = a_{ij}^{(l)} \cdot a_{jk}^{(l)}, \quad \text{то} \quad a_{ij}^{(l)} > 0; a_{ij}^{(l)} = 1, \quad i, j = \overline{1, n}.$$

Субъективные мнения экспертов усредняются, и тогда

$$a_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^L a_{ij}^{(l)} \cdot k_l}{\sum_{l=1}^L k_l},$$

а при условии, что $\sum_{i=1}^n \mu_{C(\alpha_1)}(x_i) = 1$, имеем

$$K_j = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_{C(\alpha_1)}(x_i)}{\mu_{C(\alpha_1)}(x_j)} = \frac{1}{\mu_{C(\alpha_1)}(x_j)}, \quad (1)$$

тогда по уравнению $A\mu^T = \lambda_{\max}\mu$ формируется вектор $\mu = \{\mu_{C(\alpha_1)}(x_j)\}, j = \overline{1, n}$, где

$$\{\mu_{C(\alpha_1)}(x_j)\} = \frac{1}{k_j}.$$

В общем случае, полученный по результатам обработки экспертизы вектор μ может не удовлетворять уравнению $A\mu^T = n\mu$, ибо согласованность положительной, обратносимметричной матрицы соответствует требованию $\lambda_{\max} = n$. Неравенство $\lambda_{\max} \geq n$ всегда верно. Отклонение от согласованности может быть оценено по соотношению

$$\eta = \frac{\tilde{\lambda}_{\max} - n}{n - 1}, \quad (2)$$

ибо при сравнении n элементов эксперт высказывает $(n - 1)$ суждений. Вектор $\tilde{\lambda}_{\max}$ наилучший по элементным делением вектора $A\mu^T$ на вектор μ , а $\tilde{\lambda}_{\max}$ – усредненное значение компонент вектора $\tilde{\lambda}_{\max}$. Если η не удовлетворяет по требованиям точности, то матрица A поправляется с учетом полученного вектора μ . Итерационная процедура повторяется до тех пор, пока на k -м шаге η_k будет удовлетворять требованиям точности.

Графическое представление нечетких множеств $\tilde{C}(\alpha_1), \tilde{C}(\alpha_2), \tilde{C}(\alpha_3), \tilde{C}(\alpha_4), \tilde{C}(\alpha_5)$ ЛП «начальный курсовой угол истребителя» показано на рис. 2.

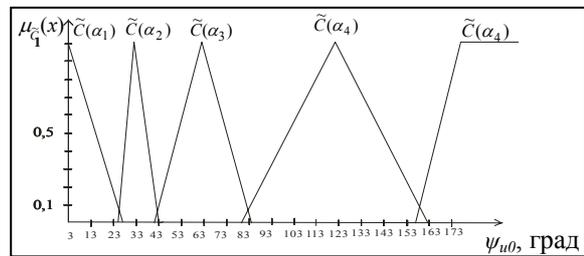


Рис. 2. Графическое представление функции принадлежности ЛП «начальный курсовой угол истребителя»

Для принятия решения лицам, принимающим решения (ЛПР), могут быть рекомендованы уровни функции принадлежности $\mu_{\tilde{C}(\alpha)} \geq 0,5$ и они могут ориентироваться на значения $\psi_{ио}$ при принятых термах на данные, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения $\psi_{ио}$ при принятых термах

«Начальный курсовой угол истребителя»						
	«Очень малый»	«Малый»	«Небольшой»	«Средний»	«Большой»	
$\psi_{ио}$	0,6	3...12	24...42	52...72	104...138	167...175
	0,7	3...7	25...40	54...70	108...133	169...175
	0,8	3...5	26...37	55...68	113...127	173...175
	0,9	3...4	28...35	58...65	116...125	174...175
	1	3	30	60	120	175

Аналогичная процедура позволяет получить значения нечетких переменных $\alpha_i, i = \overline{1,5}$ ЛП «Дальность обнаружения», «Маневр ВЦ курсом», «Дальность пуска управляемых ракет ВЦ», «Высота ВЦ», «Маневр ВЦ высотой».

Согласно метода анализа иерархий решение задачи определения по прогнозируемым факторам целесообразной стратегии предусматривает определение сравнительной важности показателей. Качественный сравнительный анализ показателей относительно их важности по отношению к цели представлен в табл. 2. Для получения значений элементов эксперты руководствовались следующим: во сколько раз рассматриваемый показатель наиболее существенный по отношению к другому с точки зрения цели. Решение матричного уравнения $A\mu^T = \lambda_{\max}\mu$ дает собственный вектор $\mu_i = (0,43; 0,24; 0,15; 0,06; 0,04; 0,03)$, $i = \overline{1,6}$.

Таблица 2

Сравнительный анализ показателей относительно их важности по отношению к цели

Показатели	Ψ_{uo}	Добн	γ	Дп	Нц	$\Delta Hц$
Ψ_{uo}	1	2	3	5	7	9
Добн	0,5	1	2	5	5	7
γ	0,33	0,5	1	3	7	7
Дп	0,2	0,2	0,33	1	2	3
Нц	0,14	0,2	0,14	0,5	1	2
$\Delta Hц$	0,11	0,14	0,14	0,33	0,5	1

После нормирования результирующий вектор приоритетов критериев, по которым принимается та или иная стратегия, имеет вид

$$\mu_i = (0,45; 0,25; 0,16; 0,06; 0,05; 0,03), i = \overline{1,6}.$$

Рассмотрим бинарные отношения предпочтений стратегий, которые составляют содержание третьего уровня иерархии. Определим, что для принятия решения могут быть рекомендованы уровни функции принадлежности $\mu_{\tilde{C}(\alpha)} > 0,6$. Так при уровнях $1...0,7$ четкие множества нечетких переменных β_j отличаются незначительно (табл. 1), то ЛПП может ориентироваться на значения Ψ_{uo} четкого множества при уровне 0,7 при принятых термах.

Бинарные сравнения на третьем уровне иерархии эксперты проводят на основе следующего: во сколько раз рассматриваемая стратегия является целесообразней по отношению к другой с точки зрения принятия решения относительно ППП отдельно по каждому показателю. Пример результатов сравне-

ний стратегий относительно шести показателей по результатам усреднений мнений 15 экспертов представлен в табл. 3 – 8. Там же представлены собственные вектора $\mu_i^H, i = \overline{1,6}$ соответствующих матриц. С целью получения целесообразной стратегии относительно обобщенных показателей реализуется принцип синтеза, согласно которого компонента вектора приоритетов относительно стратегии определяется

$$\sup_{\alpha} \sup_{0,7...1} \max_k \mu_k,$$

где $\mu_k = \sum_{i=1}^6 \mu_{i,k}^H \mu_i^H, k = \overline{1,4}$.

Для расчета компоненты μ_k данные, полученные в табл. 3 – 8, удобно представить в табл. 9.

Таблица 3

Сравнение стратегий относительно показателя «Начальный курсовой угол истребителя»

		Начальный курсовой угол истребителя				
		Очень малый ^{0,7-1}				$\mu_{i,1}^H$
		2	3	4	5	
2	1	2	0,5		0,25	0,116
3	0,5	1	0,33		0,5	0,109
4	2	3	1		4	0,418
5	4	2	0,25		1	0,151

Таблица 4

Сравнение стратегий относительно показателя «Дальность обнаружения»

		Дальность обнаружения				
		Очень малая ^{0,7-1}				$\mu_{i,2}^H$
		2	3	4	5	
2	1	2		5	7	0,441
3	0,5	1		3	5	0,230
4	0,2	0,33		1	3	0,087
5	0,14	0,2		0,33	1	0,051

Таблица 5

Сравнение стратегий относительно показателя «Маневр ВЦ курсом»

		Маневр ВЦ курсом				
		Очень малая ^{0,7-1}				$\mu_{i,3}^H$
		2	3	4	5	
2	1	2		0,33	5	0,142
3	0,5	1		0,5	3	0,126
4	3	2		1	5	0,330
5	0,2	0,33		0,2	1	0,048

Таблица 6
Сравнение стратегий относительно показателя
«Дальность пуска управляемых ракет ВЦ»

	Дальность пуска управляемых ракет ВЦ				
	Очень малый ^{0,7-1}				
	2	3	4	5	$\mu_{i,4}^H$
2	1	2	0,33	0,25	0,099
3	0,5	1	0,25	0,5	0,094
4	3	4	1	4	0,461
5	4	2	0,25	1	0,147

Таблица 7
Сравнение стратегий относительно
показателя «Высота ВЦ»

	Высота ВЦ				
	Предельно малая ^{0,7-1}				
	2	3	4	5	$\mu_{i,5}^H$
2	1	0,5	5	7	0,248
3	2	1	5	7	0,438
4	0,2	0,25	1	3	0,073
5	0,14	0,14	0,33	1	0,046

Таблица 8
Сравнение стратегий относительно
показателя «Маневр ВЦ высотой»

	Маневр ВЦ высотой				
	Очень малый ^{0,7-1}				
	2	3	4	5	$\mu_{i,6}^H$
2	1	2	0,5	0,25	0,116
3	0,5	1	0,33	0,5	0,109
4	2	3	1	4	0,418
5	4	2	0,25	1	0,151

Таблица 9
Обобщение относительно стратегий

	$\psi_{ио}$	Добн	γ	Дп	Нц	$\Delta Нц$	μ_i^H
	0,45	0,25	0,16	0,06	0,05	0,03	
2	0,116	0,441	0,142	0,099	0,248	0,116	0,207
3	0,109	0,230	0,126	0,094	0,438	0,109	0,263
4	0,418	0,087	0,330	0,461	0,073	0,418	0,47
5	0,151	0,051	0,048	0,147	0,046	0,151	0,218

Как видно по результатам оценки, следует принять решение: из рассматриваемых стратегий необходимо по нечеткой переменной α_1 всех ЛП признать стратегию {4}, которая включает следующие ППП: $\psi_{ио} = 105^\circ - 180^\circ$, метод наведения – «Погоня с упреждением», дистанции выхода на ВЦ 35 – 40 км, высота истребителя – превышение над ВЦ более 500 м. Аналогичная процедура позволяет получить целесообразные стратегии по остальным нечетким переменным α_j ЛП и их комбинациям.

Обобщение полученных результатов произведем путем формирования лингвистических продукционных правил определения целесообразных стратегий по прогнозируемым значениям факторов, характеризующих ВО и действия ВЦ противника, с целью получения рекомендации применения целесообразных ППП на этапе непосредственного планирования боевых действий истребительной авиацией.

Заключение

Параметры перехвата необходимо определять по совокупности основных показателей (критериев), которые могут иметь качественную природу. Прогнозируемые значения факторов, характеризующих ВО и действия ВЦ противника, необходимо в условиях нестохастической неопределенности. Показатели качественной природы целесообразно представлять ЛП. Формирование лингвистических продукционных правил определения целесообразных стратегий позволяет сформировать базу знаний, реализация логического вывода по информации базы знаний, позволяет получить рекомендации применения целесообразных ППП.

Литература

1. Управление полетами в частях авиации ВС СССР. – М.: Изд-во МО СССР, 1985. – 198 с.
2. Курс боевой подготовки пунктов управления ВВС. – М.: Военное изд-во, 1989. – 208 с.
3. Наставление по производству полетов авиации ВС СССР. Ч. 1. – М.: МО СССР, 1988. – 176 с.
4. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.
5. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
6. Заде Л.А. Лингвистическая переменная. – М.: Физматгиз, 1972. – 152 с.

Поступила в редакцию 16.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Ф. Кривуля, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.