УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ

Максимов Д.Ю.
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
jhanjaa@ipu.ru

Аннотация: Представлен способ построения нечетких баз знаний для управления группой беспилотных летательных аппаратов, в котором вместо нечеткой логики используется многозначная. Шкала истинностных значений этой логики не является цепью и обобщает понятие оценки в нечеткой логике.

Ключевые слова: нечеткие базы знаний, управление БПЛА, многозначная логика.

Введение

Использование нечетких баз знаний систем интеллектуальной поддержки предполагает построение алгоритмов распознавания складывающихся в полете типовых ситуаций и получение соответствующих управляющих решений [1]. При этом используется нечеткая логика второго уровня (т. н. нечеткозначная логика), в которой складывающаяся ситуация оценивается набором лингвистических переменных вместе со степенями значимости/уверенности значений этих переменных [2]. В свою очередь степени уверенности принимают уже значения в числовом отрезке, обычно [0,1]. При этом способы определения нечеткости чисто субъективны – степень нечеткости определяется экспертами. Однако не для всех лингвистических переменных обязательно должна быть такая оценка: например, для значения «помеха в плоскости *xy*» переменной «пеленг» может быть ряд оценок, опять лингвистических, типа «справа», «спереди» и т.д., которые не обязательно оценивать численно. Такие оценки определяются самой ситуацией и не нуждаются в экспертном мнении (в первом приближении). Для сравнения этих оценок можно использовать понятия не нечеткой логики, а многозначной, в которой шкала истинностных значений является решеткой общего вида.

Расширение нечеткой логики на подобные шкалы было выполнено в [3] (промежуточные итоги в [4]) и использовано в [5] для работы с системами, основанными на знании. Однако для определения импликации в этих работах используется структура моноида на решетке истинностных значений. Это позволяет работать с произвольными решетками (шкалами), но при этом остается открытым вопрос на основании чего вычислять произведения элементов решетки. В [6], для определения вариантов перехода к новой ситуации в распределенной системе, также использовалась решетка, но дистрибутивная, что снимает неопределенность в определении импликации. А в [7], для случая линейной логики, использовались общие соображения, которые позволяли вычислять импликацию, но неоднозначно.

В этой работе предлагается обычной образ действий [1], [2] по нечеткой оценке истинности консеквента импликации и принятия решения на этой основе перенести на многозначную логику с дистрибутивной шкалой истинностных значений, что позволит в первом приближении вообще обойтись без численных оценок и, соответственно, без привлечения экспертов. В качестве приложения метода рассматривается типовая ситуация обеспечения безопасности группового полета БПЛА по взаимному расположению объектов, а также при внешней помехе.

1 Постановка задачи

1.1 Элементарные математические сведения [8]

Определение 1. *Частично-упорядоченное множество* – это множество, на котором определено бинарное отношение $x \leq y$, удовлетворяющее для всех x, y, z следующим условиям:

— $x \leq x$ (рефлексивность);

— если $x \leq y$ и $y \leq x$, то $x = y$ (антисимметричность);

— если $x \leq y$ и $y \leq z$, то $x \leq z$ (транзитивность).

Это означает, что, в отличие от линейно-упорядоченного множества, не все элементы сравнимы между собой.

Определение 2. *Верхней гранью* подмножества X частично-упорядоченного множества P называется такой элемент $a \in P$, который содержит все $x \in X$.

Определение 3. *Точная верхняя грань* подмножества X ($supX$) — это такая его верхняя грань, которая содержится в любой другой его верхней грани.

Понятие *точной нижней грани* ($infX$) определяется двойственно (т.е. это наибольший элемент $b \in P$, содержащийся во всех $x \in X$).

Определение 4. *Решетка* – это частично-упорядоченное множество, имеющее для любых двух элементов их точную верхнюю грань или объединение $\bigcup$ (sup, max) и точную нижнюю грань или пересечение $\bigcap$ (inf, min).

Определение 5. *Полная решетка* – это решетка, в которой любые два подмножества имеют объединение и пересечение.

Это означает, что в непустой полной решетке есть наибольший «*1*» и наименьший «0» элементы. На диаграмме решетки (например, как на рис. 1а) чем больше элемент (т.е. вершина, узел диаграммы решетки), тем выше он расположен, и сравнимые между собой элементы лежат на одном пути из нижнего элемента в верхний. Объединение элементов на диаграмме — ближайший наибольший элемент для обоих, пересечение — ближайший наименьший для обоих. Заметим, что любая конечная решетка является полной.

Если взять такую решетку в качестве шкалы истинностных значений в многозначной логике, то наибольшему элементу будет соответствовать полная истинность (*true*), наименьшему – полная ложность (*false*), а промежуточные элементы будут соответствовать частичной истинности так же, как в нечеткой логике частичную истинность оценивают элементы отрезка [0,1].

Определение 6. *Образующими* решетки (ее *генераторами*) называются те элементы, из которых путем применения операций объединения и пересечения получаются все остальные элементы.

Определение 7. *Атомы* – это генераторы, имеющие нулевое пересечение.

Определение 8. В решетках для любых элементов a, b может быть определена *импликация* $c = a \rightarrow b$ как наибольший элемент, который пересекается с a так же, как b: $c \cap a = b \cap a$.

Определение 9. Решетка, имеющая импликации, называется *брауэровой* решеткой. В такой решетке импликация $\neg a = a \rightarrow 0$ называется *псевдодополнением* a.

В брауэровых решетках выполняются законы дистрибутивности для объединения и пересечения. Обратное верно только для конечных решеток.

1.2 Постановка задачи

БПЛА функционируют в открытом, динамически изменяющемся внешнем мире. Кроме того, несовершенство систем измерения делает знания о внешнем мире неточными. В силу этого точное, формализованное описание объекта и среды - неприемлемо сложное для осуществления. Поэтому требуется аппарат для работы с неопределенностью и размытостью понятий при разработке методов планирования поведения БПЛА. Обычно таким математическим аппаратом являются аппарат нечетких логических моделей. Формализация нечетких понятий происходит при помощи лингвистических переменных.

Определение 10. *Лингвистической* называется переменная, заданная на некоторой количественной шкале и принимающая значения во множестве словосочетаний естественного языка.

Определение 11. *Ситуацией* называется набор значений признаков, описывающих состояние объекта управления в текущий момент времени. Каждый *признак* описывается соответствующей *лингвистической переменной* со своим набором *термов* – лингвистических значений переменной.

Обычно каждое из этих значений является нечеткой переменной [2]. Именно, значение терма T_i описывается нечетким множеством $C\tilde{}\,(T_i) = \{\tau(d),d\}$ с функцией принадлежности $\tau(d)$ множеству $D = \{d\}$, которая принимает значения в отрезке [0,1] и отражает меру того, насколько числовое значение d соответствует вербальному значению, смысл которого формируется термом T_i.

Однако не обязательно задавать лингвистическую переменную именно на числовой шкале. В этой работе предполагается, что каждый терм представляется полной дистрибутивной решеткой, элементы которой оценивают степень истинности соответствующего терма так же, как и элементы отрезка [0,1] оценивают степень истинности обычной нечеткой переменной. После этого, при необходимости, можно приписать решеточным значениям термов лингвистической переменной уже числовые степени уверенности. Однако в силу того, что значения термов относятся к разным путям в решетке, нельзя определить функции принадлежности так, как в нечеткой логике.

Действительно, пусть лингвистическая переменная «высокие люди» имеет четыре терма: 0 - «низкие», α - «не очень низкие», β - «не очень высокие» и T - «очень высокие». Обычно их линейно упорядочивают так, как на Рис. 1б. Тогда их функции принадлежности имеют пересекающиеся области определения и могут иметь вид как на Рис.2в. В этом случае степени уверенности термов α и β соотносятся друг с другом через функции принадлежности. Но вообще нет оснований считать, что «не очень высокие» люди нечетко выше, чем «не очень низкие». Скорее они несравнимы и тогда решетка имеет вид Рис. 2а. В этом случае функции принадлежности имеют разные области определения и Рис. 2в уже невозможен. В этом случае числовые степени уверенности термов α и β являются уже независимыми.

При таком подходе, в системах, основанных на правилах, продукционное правило будет представляться входного значения и импликации так же, как в нечеткой логике: *y(т.е. выходное значение)* = P[*x(т.е. входное значение), x*→*y*]. Поскольку в посылку импликации, определяющей продукционное правило, и ее заключение входят переменные с разным набором термов, у каждого из которых свой набор значений (т.е. это разные решетки, например, как на Рис. 1а), то для возможности их сравнения области истинностных значений различных термов (т.е. соответствующие решетки) должны иметь нетривиальные пересечения. И для того, чтобы для них была определена общая импликация, все эти решетки должны быть подрешетками некоторой дистрибутивной (точнее брауэровой в бесконечном случае) решетки.

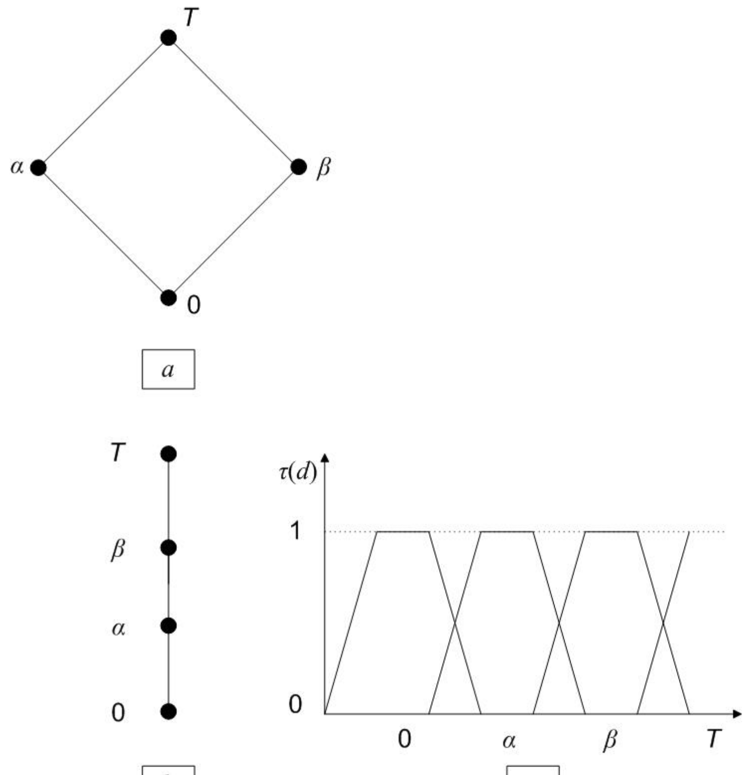

Рис. 1. Частично-упорядоченные термы (а), линейно упорядоченные (б) и функции принадлежности для линейно-упорядоченного случая

В таком подходе рассматривается типовая ситуация обеспечения безопасности группового полета по взаимному расположению объектов, а также при внешней помехе. В этом случае должно выбираться направление ухода для предотвращения возможного столкновения [1] или направление наведения на возможную цель. В [1] используется ряд признаков, влияющих на выбор направления маневра. Для простоты здесь будут рассмотрены только два таких возможных признака – «пеленг помехи» и «направление поворота». С помощью решеточных оценок значений (раздел 2.1) и числовых степеней уверенности решеточных оценок (раздел 2.2) этих признаков находятся управляющие решения по определению «направления поворота» в зависимости от «пеленга помехи».

2 Формирование управляющих воздействий

2.1 Без использования числовых оценок

При постоянном изменении информации в полете величины управляющих воздействий не остаются постоянными. Возможным способом получения управляющих решений является система, основанная на правилах, в которой правила продукций получаются по схеме нечеткого логического вывода. Обычная схема здесь такова: консеквент y (нечеткая переменная) получается из антецедента x и импликации $x \to y$ (тоже нечетких) по следующему правилу

$$y = x \circ x \to y, \qquad (1)$$

где операция $\circ$ обозначает композицию, чаще всего максиминную, нечетких переменных. При этом импликация обычно задается прецедентом, в котором x и y известны, и вычисляется по одной из множества существующих формул. Выбор одной из них предоставляется опыту разработчика. Связано это с тем, что в линейно-упорядоченной шкале истинностных значений нет однозначного определения отрицания и, соответственно, импликации [9]. Однако это не так в дистрибутивной решетке общего вида.

Рассмотрим часть дистрибутивной решетки с четырьмя атомами-образующими Рис.2.

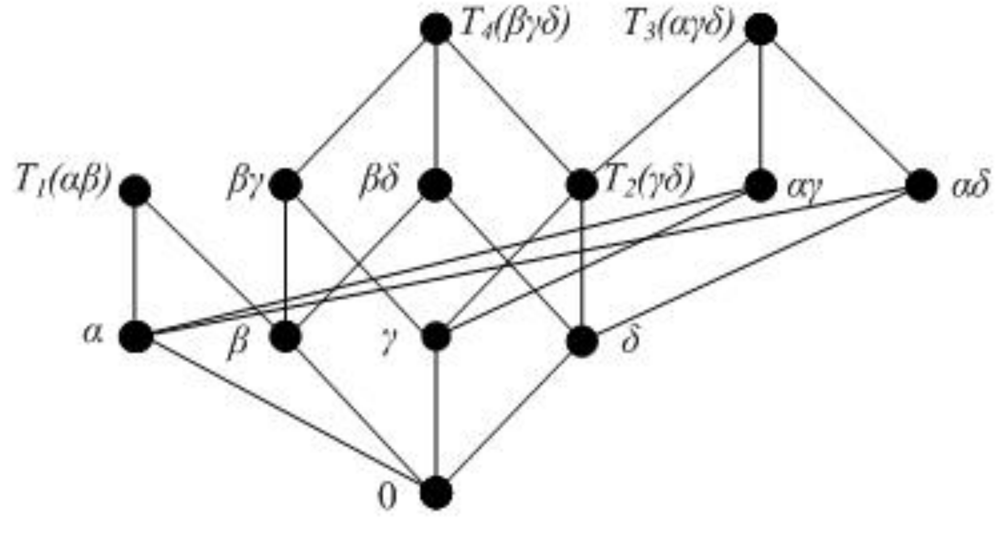

Рис. 2. Часть решетки для оценки истинностных значений ситуации обнаружения помехи

На этом рисунке для упрощения используются обозначения $\alpha\beta \equiv \alpha \cup \beta$ и для других объединений так же. Придадим следующие смыслы элементам этой решетки. Пусть лингвистическая переменная x –«пеленг», – состоит из двух термов T_1 = (α, β, $\alpha\beta$, 0) – «помеха в горизонтальной плоскости» с оценками α – «слева», β – «справа», $\alpha\beta$ – «впереди» и T_2 = (γ, δ, $\gamma\delta$, 0) – «помеха в продольной вертикальной плоскости» с оценками γ – «сверху», δ – «снизу», $\gamma\delta$ – «впереди». Общая оценка 0, являющаяся пересечением образующих атомовх, трактуется как «сзади», а объединения – $\alpha\beta$ и $\gamma\delta$ – трактуются как «впереди».

Пусть лингвистическая переменная y – «поворот» также состоит из двух термов T_3 = (α, γ, δ, $\alpha\gamma$, $\alpha\delta$, $\gamma\delta$, $\alpha\gamma\delta$, 0) – «в левую полусферу» и T_4 = (β, γ, δ, $\beta\gamma$, $\beta\delta$, $\gamma\delta$, $\beta\gamma\delta$, 0) – «в правую полусферу» с очевидными комбинациями оценок для T_1 и T_2: например, $\alpha\gamma$ обозначает «влево и вверх», а $\alpha\gamma\delta$ – «вперед и влево». Предположим, что x = (<α $|T_{1>}$, <γ $|T_{2>}$), т.е. помеха находится слева и сверху. Надо определить y = (<? $|T_{3>}$, <? $|T_{4>}$). По смыслу решеточной импликации $z = x \rightarrow y$ для y имеем ограничение: $x \cap z \leq y \leq z$. Поэтому для z имеем:

$$\text{(2)} \qquad x \rightarrow y = \begin{pmatrix} z_1, z_3 \\ z_2, z_4 \end{pmatrix},$$

где $z_1, z_2 \in T_3$; $z_3, z_4 \in T_4$. В самом общем случае y может быть любым в T_3 и T_4. Но, ***при максиминной композиции***, получаем следующие возможные значения y:

$$\text{(3)} \qquad y = (\sup \begin{pmatrix} \alpha \cap z_1 \\ \gamma \cap z_2 \end{pmatrix}_{T3}, \sup \begin{pmatrix} \alpha \cap z_3 \\ \gamma \cap z_4 \end{pmatrix}_{T4}) = (< \alpha \vee \gamma \vee \alpha\gamma \vee 0 \,|\, T_3 >, < \gamma \vee 0 \,|\, T_4),$$

где знаком $\vee$ отделяются возможные варианты. При максимальных значениях z: $z_1 = z_2 = \alpha\gamma\delta$ и $z_3 = z_4 = \beta\gamma\delta$ получаем наведение БПЛА на помеху: $y = (< \alpha\gamma \,|\, T_3 >, < \gamma \,|\, T_4 >)$ – управляющий импульс влево и вверх.

Для получения правила ухода от помехи следует использовать другую композицию. Предположим, что для того же x = (<α $|T_{1>}$, <γ $|T_2$>) (помеха слева и сверху) есть прецедент y = (< δ $|T_3$>, < $\beta\delta$ $|T_4$>) – уход вправо и вниз. Тогда для z можно использовать матрицу

$$\text{(4)} \qquad x \rightarrow y \overset{def}{=} \neg x = \begin{pmatrix} \gamma\delta, \beta\gamma\delta \\ \alpha\delta, \beta\delta \end{pmatrix}$$

откуда получается **правило продукции** $y = P[x, x \rightarrow y] = \min \neg x$. Здесь отрицание x берется относительно T_3 и T_4. При таком правиле БПЛА будет всегда уходить в сторону от помехи. Однако при фронтальной помехе x = (<αβ $|T_{1>}$, < $\gamma\delta$ $|T_2$>) имеем такую матрицу

$$\text{(5)} \qquad \neg x = \begin{pmatrix} \gamma\delta|_{T3} & \gamma\delta|_{T4} \\ \alpha|_{T3} & \beta|_{T4} \end{pmatrix}.$$

Здесь от элемента $\alpha\beta$ решетки T_1 остается его пересечение α с решеткой T_3. В этой решетке и берется дополнение α и дополнение $\gamma\delta$. И так же для T_4 – от $\alpha\beta$ остается β, которое имеет дополнение $\gamma\delta$ в T_4, а $\gamma\delta$ имеет дополнение β. Отсюда для импульса имеем $y = (< 0 \,|\, T_3 >, < 0 \,|\, T_4 >)$ – что можно трактовать как торможение или разворот назад.

Такое поведение определяется только выбором правила композиции и видом шкалы истинностных значений. В последнем случае фронтальной помехи при этом было получено торможение/разворот, что может быть недостаточным для определения траектории полета. Но здесь везде использовались только две лингвистические переменные, в то время как полное описание тактической ситуации требует намного большего их количества [1]. В таком случае, при наличии, например, определенного значения переменной «крен» БПЛА будет отворачивать в сторону крена. Также, при построении решетки, не принимались во внимание возможные положения помехи и варианты поворота в задней полусфере, потому что это сильно усложняет решетку. Учет дополнительных лингвистических переменных и усложнение шкалы истинностных значений позволяет выбирать управляющие решения в более полном наборе вариантов.

2.2 С использованием числовых оценок

Если решеточные оценки термов лингвистической переменной известны с какой-то степенью уверенности, то поведение системы определяется также менее уверенно и можно воспользоваться обычной процедурой нечетких оценок лингвистических переменных уже нового уровня. Например, пусть переменная «пеленг» имеет следующие нечеткие решеточные значения: x = (<0,8α; 0,4$\alpha\beta$; 0β; 00$|T_1$>, < 0,4γ; 0,6$\gamma\delta$; 0δ; 00$|T_2$>). Т. е. помеха с уверенностью **0,8 слева**, с уверенностью **0,6 спереди** и с уверенностью **0,4 сверху**. Здесь выбираются наибольшие степени уверенности при совпадении значений термов, т. е. из оценок для уверенности по направлению вперед – 0,4$\alpha\beta$ и 0,6$\gamma\delta$ – берется оценка 0,6 **(**Рис.3).

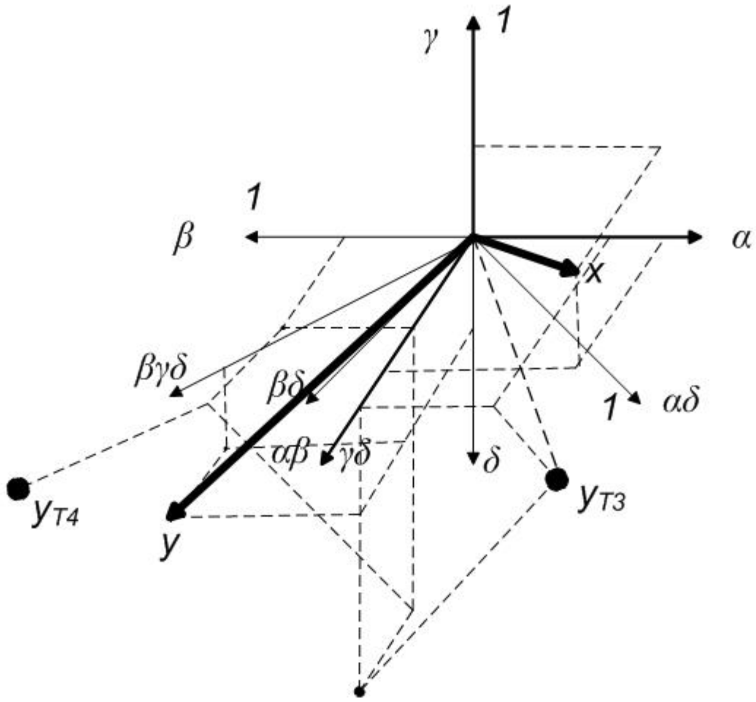

Рис. 3. К вычислению значений переменной «поворот» для случая ухода от помехи в пространстве термов переменных со степенями уверенности

Тогда, при **минимальных оценках** возможных значений *у* с наибольшими степенями уверенности (т. е. при варианте максиминного правила) получается, что переменная «поворот» имеет следующие оценки:

(6) $$y = (<0{,}8\alpha;\ 0{,}4\gamma;\ 0{,}6\gamma\delta;\ 0\delta;\ 00|T_3>, <\ 0{,}4\ \beta;\ 0{,}4\gamma;\ 0{,}6\gamma\delta;\ 0\delta;\ 00|T_4>).$$

Это означает, что БПЛА будет наводиться на цель с уверенностью уже **0,4 налево** и с теми же степенями уверенности по остальным значениям термов, что и у помехи. Так происходит потому, что от оценки $0{,}4\alpha\beta$ в шкале T_4 остается оценка 0,4 β (направо с уверенностью 0,4), которая вычитается из $0{,}8\alpha$ (налево с уверенностью 0,8).

При использовании продукционного **правила с отрицанием**, т. е. для ухода от помехи, получаем для переменной «поворот» другие оценки (опять с наибольшими степенями уверенности):

(7) $$y = (<\neg 0{,}8\alpha;\ \neg 0{,}4\gamma;\ \neg 0{,}6\gamma\delta;\ \neg 0\delta;\ \neg 00|T_3>, <\neg 0{,}80;\ \neg 0{,}4\beta;\ \neg 0{,}4\gamma;\ \neg 0{,}6\gamma\delta;\ \neg 0\delta|T_4>) =$$
$$= (<0{,}8\ \gamma\delta;\ 0{,}4\alpha\delta;\ 0{,}6\alpha;\ 0\alpha\gamma;\ 0\alpha\gamma\delta|\ T_3>, <0{,}8\beta\gamma\delta;\ 0{,}4\gamma\delta;\ 0{,}4\beta\delta;\ 0{,}6\beta;\ 0\beta\gamma|T_{4>}).$$

В этом случае оценки $0{,}6\alpha$ и $0{,}6\beta$ сокращаются, от $0{,}4\alpha\delta$ и $0{,}4\beta\delta$ остается $0{,}4\delta$ и остается $0{,}8\gamma\delta$ и $0{,}8\beta\gamma\delta$ – т. е. БПЛА получает относительный импульс **вниз (с уверенностью) 0,4**, **вперед (с уверенностью) 0,8** и **вправо-вперед** тоже **с уверенностью 0,8** (Рис.3).

Подчеркнем, что здесь опять не учитывались другие переменные, уточняющие ситуацию. Например, направление движения помехи, ее относительная скорость, крен самого БПЛА и др. Уточнение ситуации может привести к изменению управляющего импульса.

Заключение

В этом докладе представлен способ принятия решения на основе нечеткозначной логики (нечеткой логики второго уровня). Однако, в отличие от обычного ее употребления, предполагается, что нечеткие значения термов лингвистических переменных не линейно упорядочены, а образуют дистрибутивные решетки, т. е. упорядочены только частично. В этом случае значения термов не являются числами, а сами представляются словосочетаниями естественного языка и, уже в свою очередь, могут быть нечеткими переменными с числовыми оценками. Таким образом, в конструкцию лингвистических переменных добавляется, фактически, еще один лингвистический уровень. Но элементы этого уровня вполне могут заменять числовые оценки в нечеткозначной логике, что продемонстрировано в простейшем примере обеспечения безопасности группового полета БПЛА.

Литература

1. *Гайнуллин И.А., Рогалев А.П.* Построение нечетких баз знаний ситуационных систем интеллектуальной поддержки решения задач авиационных бортовых комплексов // Авиакосмическое приборостроение. 2007, №2. – С.57-66.
2. *Поспелов Д.А.* Логико-лингвистические модели в управлении. – М: Энергоиздат, 1981.
3. *Goguen J.A.* The logic of inexact concepts // Synthese. Vol. 19. 1969. – P.325-373.
4. *Xu Y., Ruan D., Qin K.Y., Liu J.* Lattice-Valued Logic: An Alternative Approach to Treat Fuzziness and Incomparability. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.
5. *Liu J., Lu Z., Martinez L., Xu Y.* Preference Criterion and Consistency in the Rule-Based System Based on a
6. Lattice-Valued Logic// EUROFUSE WORKSHOP: New Trends in Preference Modeling and Applications. 2015, Dec. – P.99-104.
7. *Maximov D.Y.* Reconfiguring system hierarchies with multi-valued logic // Automation and Remote Control. Vol. 77. 2016, №3. – P.462-472.
8. *Maximov D.Y., Legovich Y.S., Ryvkin S.E.* How the structure of system problems influences system behavior // Automation and Remote Control. Vol. 78. 2017, №4. – P.689-699.
9. *Birkhoff G.* Lattice Theory. – Providence, Rhode Island. 1967.
10. *Максимов Д.Ю.* Логика Н.А. Васильева и многозначные логики // Логические исследования. Т. 22. 2016, № 1. – С. 82-107.