УДК 519.6:621.865.8

# МОДЕЛИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

**В.А. Погонин**

*Кафедра «Информационные процессы и управление», ТГТУ*

**Ключевые слова и фразы:** бинарные отношения; модели принятия решений; мультиагентное управление роботами.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы, связанные с выбором наилучших маршрутов мобильных роботов в условиях неопределенности, перемещение которых существенно зависят от влияния внешней среды, на основе использования бинарных отношений.

---

В последнее время резко возрос интерес к проблемам построения высокоэффективных и высоконадежных систем диспетчерского управления: с одной стороны, это связано со значительным прогрессом в области вычислительной техники, программного обеспечения и систем телекоммуникаций, что увеличивает возможности и расширяет сферу применения автоматизированных систем управления роботизированными химическими производствами (**РоАСУХП**); с другой – развитие информационных технологий, повышение степени автоматизации перераспределение функций между человеком и аппаратурой управления обострило проблему взаимодействия человека-оператора со сложной (распределенной) системой управления.

Анализ данных по проблемам построения эффективных систем диспетчерского управления показал необходимость построения эффективного человеко-машинного интерфейса [1].

РоАСУХП с несколькими мобильными средствами робототехники (**СР**), осуществляющими одновременное движение, является типичным примером распределенной системы. Для одного мобильного СР задача управления ставится как планирование маршрута минимальной длины из начального положения в конечное. Данная проблема рассматривается многими исследователями, и существуют различные способы ее решения [2, 3].

Для случая нескольких мобильных СР задача управления формулируется как планирование перемещения из начальных в конечные положения всех СР по кратчайшим (оптимальным) маршрутам, обеспечивающим бесконфликтное движение, причем СР могут начинать движение в любое время. При такой постановке задачи возникает много новых проблем, например, как синхронизировать движение нескольких СР, как учитывать движение других роботов, как разрешать конфликтные ситуации и т.п. [4, 5].

В случае, когда система управления не может оценить конфликтную ситуацию и выполнить необходимые действия по ее устранению, или в случае аварийного режима функционирования химического производства, решения об управлении СР, например, выбор движения СР, распределении ресурсов «рабочих бригад» и т.д., принимает оператор.

Вопросы, связанные с выбором наилучших маршрутов движения СР, которые существенно зависят от влияния внешней среды, будем рассматривать на основе использования бинарных отношений.

Обозначим через $X$ – множество конкурсных решений, которое для большинства практических задач конечно. Элементами множества $X$ являются маршруты движения СР, которые будем называть решениями и обозначать $x$, $y$, $x \in X$, $y \in X$.

Таким образом множество $X$ может содержать не одно, а целый ряд допустимых решений, что обуславливается следующими причинами: в условиях современных роботизированных химических производств внешняя среда оказывает существенное влияние на процесс выбора маршрута движения СР, например, посредством возникновения динамических препятствий (роботов, роботов-лаборантов, в том числе мобильных, изменения трубных коммуникаций при смене технологии, замене оборудования при выпуске новой продукции и т.п.).

Однако, следует отметить еще одну причину, определяющую существование набора допустимых решений, так как часто существуют различные варианты маршрутов движения СР. Выбор наиболее предпочтительного маршрута, в каждом конкретном случае, может быть осуществлен по сложному векторному критерию с учетом использования механизма бинарных отношений.

Компонентами сложного векторного критерия могут быть: время перемещения или время выполнения работы СР, точность позиционирования, динамическая нагрузка на элементы СР, энергетические затраты на перемещение СР или на выполняемую ими работу и т.п. При формировании сложного векторного критерия нормировку его компонент можно провести по алгоритму, предложенному в [6].

Очевидно, что алгебраическое сравнение данных компонент невозможно и может быть выполнено на основе использования бинарных отношений предпочтения.

На основе $X$ сформируем множество упорядоченных пар $E = X \times X$. Пару решений будем обозначать $(x, y)$. Произвольное бинарное отношение определим как $R \subseteq E$. К бинарным отношениям применимы все теоретико-множественные операции [7].

Наличие факторов неопределенности приводит к необходимости использовать более эффективные категории нечетких множеств. При этом в задачах принятия решений (выбор наилучших маршрутов движения СР) появляется нечеткое отношение предпочтения, которое является аналогом критерия эффективности или четкого отношения предпочтения. Например, неопределенность, возникающую из-за несогласованности действий СР «рабочих бригад», часто описывают при помощи нечеткого отношения. Теория принятия решений при наличии нескольких нечетких отношений, на наш взгляд, не получила достаточного развития.

В общем случае нечеткое отношение предпочтения П сформулируем следующим образом

$$\Pi = \{E, \mu(x, y)\},$$

где $E$ – множество пар решений; $\mu\,(x, y)$ – функция принадлежности нечеткого отношения.

Будем считать, что выполняется условие $0 \le \mu(x, y) \le 1$, и различать два типа отношений:

1) нестрогое – обладает свойством «рефлектности», т.е. $\mu(x, y) = 1$, $\forall x \in X$;

2) строгое – обладает свойством "асимметричности" (если $\mu^s\,(x, y) > 0$, то $\mu^s\,(x, y) = 0$), где $s$ – строгое отношение предпочтения.

Для каждого нечеткого отношения предпочтения П существует обратное нечеткое отношение $\Pi^{-1}$ с функцией принадлежности $\mu(x, y)$.

Каждому нечеткому отношению предпочтения П соответствует строгое отношение предпочтения

$$\Pi^s = \{E, \mu^s\,(x, y)\},$$

где $\mu^s(x,y) = \begin{cases} \mu(x,y) - \mu(x,y) = \Delta(x,y), \ \Delta(x,y) \ge 0; \\ 0, \Delta(x,y) < 0. \end{cases}$

Если задано строгое нечеткое отношение предпочтения $\Pi^s$, то можно ввести в рассмотрение следующие величины:

$$\mu^{nd}\,(x) = 1 - \max \mu^s\,(y, x);$$

$$X^{und} = \{x \mid \mu^d\,(x) = 1\},$$

где $X^{und}$ – множество, которое содержит четко недоминирующее решение.

Это эффективные, то есть самые лучшие решения для данного случая, из которого необходимо сделать выбор. Поэтому $X^{und}$ является аналогом множества Парето для задачи принятия решений в условиях неопределенности.

Пусть заданы два нечетких отношения предпочтения $\Pi_1$ и $\Pi_2$ и им соответствуют строгие нечеткие отношения предпочтения $M_1^s$ и $M_2^s$. Причем из включения $\Pi_1 \subseteq \Pi_2$ не следуют включения $M_1^s \subseteq M_2^s$. Это можно проверить непосредственно. Отметим, что $\Pi_1 \subseteq \Pi_2$ в теории нечетких множеств означает, что

$$\mu_1(x, y) \le \mu_2(x, y), \quad \forall\ (x, y) \in E.$$

У т в е р ж д е н и е 1. Пусть заданы два произвольных нечетких отношений предпочтения $\Pi_1$ и $\Pi_2$, для которых выполняется $M_1^s \subseteq M_2^s$. Тогда имеет место $x_2^{ud} \le x_1^{ud}$.

Д о к а з а т е л ь с т в о: Пусть $x \in X_2^{ud}$. Это означает, что $\mu_2^s(x, y) = 1$ или тоже самое $\mu_2^s(x, y) = 0$, для $\forall y \in X$, включая $x$. Имеет место условие $0 \le \mu_1^s(x, y) \le \mu_2^s(x, y)$ для $\forall\ (x, y) \in E$ и, следовательно, $\mu_1^s(y, x) = 0$ для $\forall y \in X$, включая $x$, $\mu_1^{nd}(x) = 1$ и $x \in X_1^{und}$. Обратное рассуждение неверно и, следовательно, $x_2^{und} \subseteq x_1^{und}$.

Утверждение 1 доказано.

О п р е д е л е н и е 1. Величину $\Delta(x, y) = \mu(x, y) - \mu(y, x)$ будем называть степенью превосходства для задачи принятия решений с нечетким отношением предпочтения.

Действительно, величина $\Delta(x, y)$ меняет знак при перестановке аргументов, т.е. $\Delta(x, y) \in H$ и поэтому является степенью превосходства, а переход между ними однозначен и его можно осуществить уже на уровне результата.

Отметим, что в теории нечетких множеств величина $\Delta(x, y)$ не имеет смыслового содержания. Множество четко недоминирующих решений можно определить с помощью множества степени превосходства

$$X^{und} = \{x \mid \Delta(y, x) \le 0, \quad \forall y \in X\}.$$

Введем некоторое четкое отношение предпочтения.

О п р е д е л е н и е 2.

$$F = \{(x, y) \mid \Delta(x, y) \ge 0\}.$$

Это связное нестрогое отношение предпочтения. Для него можно ввести $F^{-1}$ и $F^s$.

У т в е р ж д е н и е 2.

$$X_\Pi(F) = X^{und}.$$

Д о к а з а т е л ь с т в о: Пусть $x \in X^{und}$, тогда согласно (3) получим $\Delta(y, x) \le 0$ для $\forall y \in X$, т.е. не найдется такое решение $y \in X$, для которого $\Delta(y, x) > 0$ или $(y, x) \in F^s$. Следовательно, по определению множества Парето, $x \in X_п(F)$. Проведем обратное рассуждение. Пусть $x \in X_П(F)$ и это означает, что не $\exists y \in X$, для которого выполнялось бы $(y, x) \in F^s$. Следовательно, имеет место неравенство $\Delta(y, x) \le 0$ для $\forall y \in X$, а это означает, что $x \in X^{und}$.

Утверждение 2 доказано.

Таким образом, если нас интересует только множество четко недоминируемых решений, то нам предоставляется возможность перехода от нечеткого отношения предпочтения к четкому отношению предпочтения. Введем отношение $F$ , которое будет представлять интерес еще и по другим причинам. Прежде всего, отметим следующие:

1) из $F_1 \subseteq F_2$ всегда следует $x_1^{ud} \subseteq x_2^{ud}$ , поскольку эти отношения связные (утверждение 2);

2) из $П_1 \subseteq П_2$ не всегда следует $F_1 \subseteq F_2$.

На основе $\Delta(x, y)$ можно ввести β-уровневое отношение предпочтения в виде

$$F(\beta) = \{(x, y) \mid \Delta(x, y) \ge \beta\},$$

где $0 \le \beta \le 1$.

Это четкое, несвязное, строгое отношение предпочтения, причем, $F(0) = F$.

К отношению $F(\beta)$ можно, в случае необходимости, добавить отношение равноценности $\lambda = \{(x, y) \mid \Delta(x, y) = 0\}$ и тем самым получить β-уровневое нестрогое отношение предпочтения.

В общем случае $F(\beta)$ нетранзитивно, поскольку $\Delta(x, y) \notin T$, так как $F(\beta) \subseteq F(0)$ и $X_П(0) \subseteq X_П(\beta)$. Перепишем их в более наглядной форме, а именно, $F(\beta) \subseteq F$ и $X^{und} \subseteq X_П(\beta)$.

Если в случае многокритериальной задачи принятия решений все α-уровневые множества Парето входили в исходное множество Парето $X_П^J$ , то в этом случае, наоборот, исходное множество эффективных решений входит во все β-уровневые множества эффективных решений.

Если $\beta \neq 0$, то решения из $X_{\Pi}(\beta)$ уже не назовешь четко недоминируемым. Поэтому множество эффективных решений обозначим $X^{nd}(\beta)$. Чтобы это обозначение сделать еще более наглядным и смысловым, свяжем $\beta$ с «уровнем недоминируемости».

Степень недоминируемости решения $x$ определяется функцией принадлежности $\mu^{ud}(x)$, величина которой лежит в интервале [0, 1]. Можно задать уровень недоминируемости в виде некоторого числа $r \in [0, 1]$ или в виде неравенства $\mu^{ud}(x) > r$ , а затем выделить все $x \in X$, которые удовлетворяют этому неравенству,

$$X^{ud}(r) = \{x \mid \mu^{ud}(x) > r\}.$$

Между $\beta$ и $r$ наблюдается следующая зависимость $r = 1 - \beta$. С увеличением множество $X^{d}(r)$ расширяется, тогда как с увеличением $r$ оно уменьшается. Причем $X^{d}(1) = X^{ud}$.

Рассмотрим связь $\beta$ с $r$ более подробнее, что позволяет сделать более наглядной структуру множества $X^{ud}(r)$ и его взаимосвязь с $F(\beta)$, а также выявить некоторые его свойства.

Утверждение 3.

$$X^{nd}(r) = X^{nd}(\beta).$$

Доказательство: Ранее рассматривалось, что $X^{ud}(\beta)$ является обозначением множества $X_{\Pi}(\beta)$, которое, в свою очередь, соответствует $F(\beta)$. Пусть $x \in X^{nd}(\beta)$, а это означает, что не $\exists y \in X$, для которого выполнялось бы $(y, x) \in \in F(\beta)$. Отсюда вытекает условие $\Delta(y, x) < \beta$ для $\forall y \in X$. Если $\beta \geq 0$, тогда верно $\max\limits_{y \in X} \mu^{s}(y, x) < \beta$ и, следовательно, $\mu^{nd}(x) > 1 - \alpha = r$, т.е. $x \in X^{ud}(\beta)$ и $r = 1 - \beta$.

Проведем обратное рассуждение. Пусть $x \in X^{ud}(r)$, а это означает, что $\mu^{nd}(x) > r$. Откуда непосредственно следует, что $\max\limits_{y \in X} \mu^{s}(y, x) < \beta = 1 - r$ и, следовательно, $\Delta(y, x) < \beta$ для $\forall y \in X$ или $x \in X_{\Pi}(\beta) = X^{ud}(\beta)$, т.е. имеет место равенство $X^{nd}(r) = X^{nd}(\beta)$.

Утверждение 3 доказано.

Утверждение 4.

Если $r_1 > r_2$, то $x^d(r_1) \subseteq x^d(r_2)$.

Доказательство: Если $r_1 > r_2$, то $\beta_1 > \beta_2$. Это значит, что $F(\beta_2) \subseteq \subseteq F(\beta_1)$. Одновременно выполняется $X_\Pi(\beta_1) \subseteq X_\Pi(\beta_2)$ и на основе утверждения 3 $x^d(r_1) \subseteq x^d(r_2)$, что и требовалось доказать.

Рассмотрим векторное нечеткое отношение предпочтения. Введем для сравнения пар решений некоторый набор $P$ произвольных нечетких отношений предпочтения, определенных на $E$

$$P = \{\mu_1(x, y), \quad \mu_2(x, y), \dots, \mu_m(x, y)\}.$$

Это полный аналог многокритериальной задачи принятия решений. Только в качестве критериев эффективности выступают нечеткие отношения предпочтения. Каждому значению функции принадлежности $\mu_j(x, y)$ соответствует свое значение $\mu_j^s(x, y)$ и $F_j$.

Свойство $F_j$ позволяет сделать вывод о том, что векторное отношение предпочтения необходимо вводить на основе использования $F_j$ и по аналогии с многокритериальными задачами принятия решений.

Определение 3.

Решение $x$ нестрого доминирует над решением $y$ по набору нечетких отношений, если имеет место

$$(x, y) \in F_i, \quad \forall i = \overline{1, m}.$$

Обозначим $F_p$. Очевидно, что $F_p = \bigcap_{i=1}^{m} F_i$. Можно ввести $F_p^s$ и, следовательно, $X_\Pi(F_p)$. Решения, вошедшие в это множество Парето, являются четко недоминируемыми по всему набору нечетких отношений предпочтения. Именно поэтому обозначим $X_\Pi(F_p) = x_p^{ud}$.

Решение $x$ нестрого доминирует над решением $y$ по набору нечетких отношений предпочтения $P$, если выполняются условия

$$\mu_i(x, y) \geq \mu_i(y, x), \quad \forall i = \overline{1, m}.$$

Если при этом хотя бы одно неравенство окажется строгим, то $x$ будет строго доминировать над $y$ по $P$.

Рассмотрим, как на основе набора $P$ ввести одно единственное нечеткое отношение предпочтения с функцией принадлежности $\mu_P(x, y)$.

Функцию принадлежности $\mu_P(x, y)$ предлагается ввести следующими способами:

1) $\mu_P(x, y) = \min\limits_{i=\overline{1, m}} \mu_i(x, y)$;

2) $\mu_P(x, y) = \sum\limits_{i=1}^{m} \lambda_i \mu_i(x, y)$,

где $\lambda_i$ – коэффициенты «важности» для нечетких отношений предпочтения рассматривались ранее.

Обе эти свертки не нарушают требований, предъявляемым к функциям принадлежности, т.е. они действительно задают новые нечеткие отношения предпочтения. При этом оказывается, что вторая свертка обладает лучшими свойствами по сравнению с первой сверткой. Это справедливо и для многокритериальных задач.

На основе второй свертки можно ввести β-уровневое отношение предпочтения в виде

$$L(\beta) = \{(x, y) \mid \sum_{i=1}^{m} \lambda_i [\mu_i(x, y) - \mu_i(y, x)] \geq \beta\}. \quad (1)$$

Последнее выражение лежит в основе решения задач принятия решений на основе использования β-уровневых моделей. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

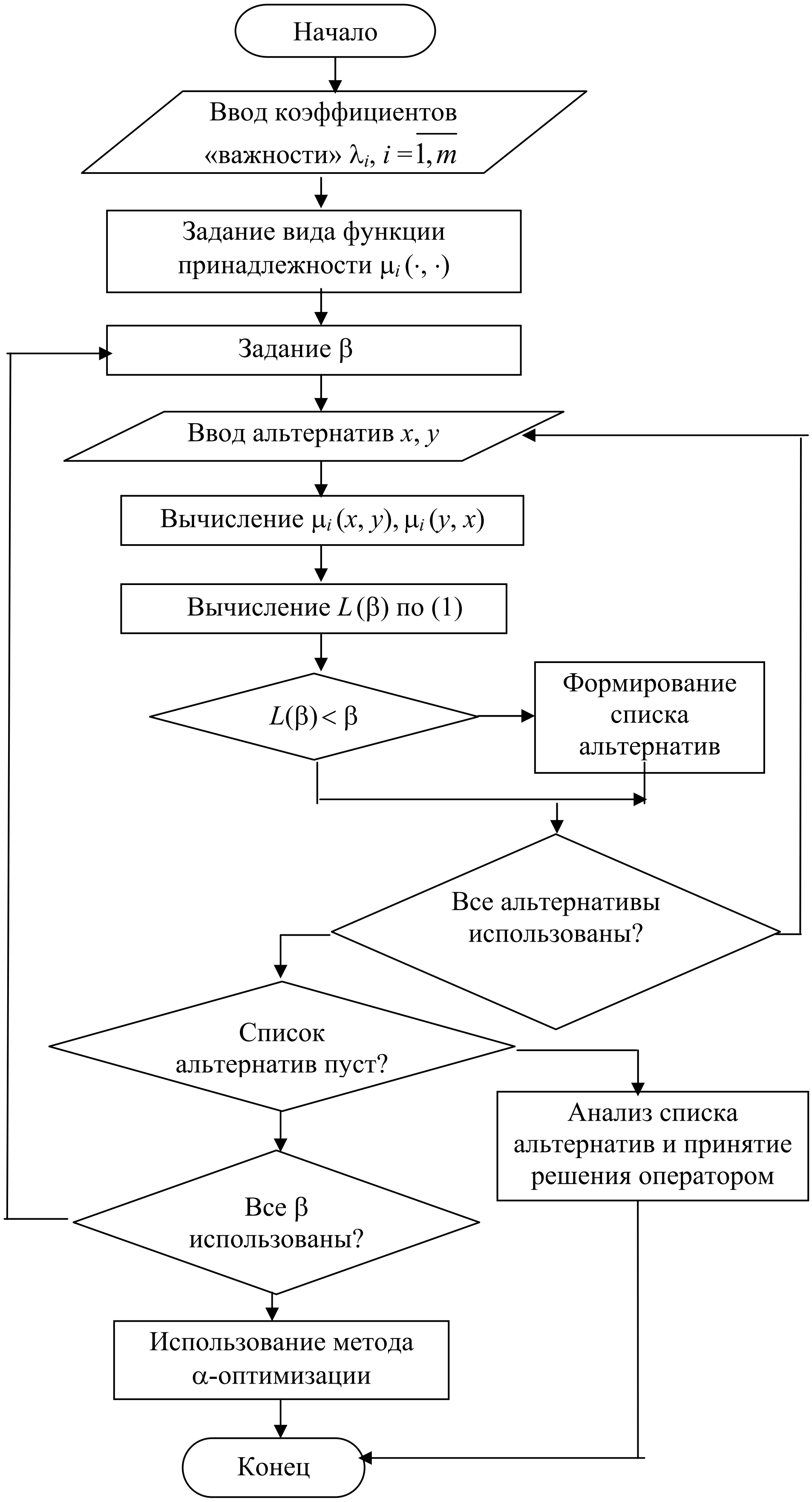


**Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения $\beta$-уровневых моделей задач принятия решений**

*Список литературы*

1. Палюх, Б.В. Информационно-программный комплекс прогнозирования развития и последствий аварийных ситуаций / Б.В. Палюх, С.В. Луньков, А.Н. Прохныч. – М. : ГосНИИОХТ, 2002. – 37 с.

2. Ильин, В.А. Планирование траекторий и управление подвижными роботами в условиях неполной информации о расположении препятствий / В.А. Ильин, В.С. Кириченко. – Красноярск : САА, 2000. – С. 14 – 19.

3. Попов, Э.В. Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта / Э.В. Попов, Г.Р. Фридман. – М. : Наука, 1976. – 302 с.

4. Тимофеев, А.В. Мультиагентные системы планирования поведения роботов в среде с препятствиями / А.В. Тимофеев // Экстремальная робототехника : X конф. –2000. – С. 6.

5. Колушев, Ф.А. Мультиагентные и локальные алгоритмы планирования маршрутов транспортных роботов в среде с препятствиями / Ф.А. Колушев, А.В. Тимофеев. – СПб., 1998. – С. 49 – 47

6. Дубов, Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М. : Наука, 1986. – 296 с.

7. Орловский, С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 203 с.

---

## MODELS OF ROBOT MONITORING

**V.A. Pogonin**

**Key words and phrases:** binary relationships; decision making models; multiagent robot control.

**Abstract:** The problems connected with the best route of mobile robots in uncertainty conditions, robots' moving depends on environment are considered based on binary relationships.