

УДК 004.891.3

Е.И. Кучеренко, А.Д. Дрюк

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## РАСШИРЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ

*В работе выполнен содержательный анализ существующих моделей и методов решения задач оптимального управления мобильными объектами. Модифицирована формальная модель перемещения мобильного объекта по заданной траектории с учетом помех. Определены точностные показатели модели. Подтверждена эффективность подхода. С целью повышения эффективности настройки нечеткой модели выполнена модификация нечетких процессов, представленных интервальными функциями принадлежности. Разработаны критерии адекватности модели объекта. Выполнена проверка функционирования полученной модели, подтвердившая адекватность модели и процессов.*

**Ключевые слова:** *мобильный объект, нечеткая логика, траектория, помеха, оптимизация, функция риска, модель типа 2.*

### Введение

Управление процессами перемещения мобильных объектов предполагает решение комплекса взаимосвязанных задач. При этом возникают проблемы, от которых непосредственно зависит качество функционирования объектов [1, 2]. Показатели, которые определяют качество функционирования мобильных объектов, можно представить в виде решения:

- формализация представления модели с определением ограничений на характер перемещения;
- исследование адекватности модели на множестве ограничений предметной области;
- оптимизация процессов управления согласно критерию минимума ошибки;
- обеспечение быстродействия на множестве показателей предметных областей функционирования объекта.

Как показал аналитический обзор существующих решений [1–3], наименее исследованными являются задачи модификации нечетких моделей перемещения мобильного объекта с целью повышения эффективности их настройки в условиях помех.

Таким образом, в работе необходимо исследовать и получить новые решения fuzzy-моделей, обеспечивающих минимизацию ошибки маршрутизации объекта.

### 1. Анализ последних исследований и публикаций

В существующих моделях обычно [1, 2] после вычисления траектории мобильного объекта строится кривая маршрутизации, равноудаленная от границ траектории. Затем с некоторым периодом вычисляются значения нечетких термов  $\tilde{d}$  и  $\tilde{\alpha}$  – смещения центра мобильного объекта относительно

кривой маршрутизации и угла поворота мобильного объекта относительно этой же кривой соответственно. Эти значения подставляются в функцию регулирования и согласно правилам продукции вычисляется значение  $\tilde{\omega}$  – угловой скорости мобильного объекта, определяющей величину поворота мобильного объекта для корректировки его траектории. При этом для настройки параметров нечетких термов и весов правил используется обучающая выборка.

Также для настройки предложенной модели требуется оптимизировать функцию от 30 параметров, что связано с большими затратами вычислительных ресурсов. В связи с этим предлагается модифицировать модель так, чтобы существенно уменьшить количество настраиваемых параметров.

В работе [2] разработана нечеткая модель перемещения мобильного робота по заданной траектории. Согласно этой модели, робот может двигаться вдоль произвольной наперед заданной линии и обнаруживать препятствия на своем пути, однако не способен объезжать препятствия. Кроме того, модель не предполагает оптимизацию маршрута мобильного объекта. В связи с этим, для решения поставленной задачи модель требует дополнительных исследований.

В работе [3] предлагается метод управления мобильным роботом в неопределенной среде на основе нечеткой логики. Этот метод позволяет роботу объезжать возникающие у него на пути помехи и достигать целевой точки всегда, когда это возможно.

Предложенный метод является достаточно простым; кроме того, он гарантирует достижения цели роботом независимо от условий окружающей среды. Однако оценить время достижения цели мобильным роботом с помощью данного метода не представляется возможным – иными словами, при

достаточно большом количестве препятствий робот может двигаться к цели сколь угодно долго. Таким образом, применение метода для решения поставленной задачи нецелесообразно.

## 2. Постановка задачи исследования

Пусть территория производственного помещения представляет собой прямоугольное поле размера  $N \times M$ , разбитое на единичные клетки, причем  $N = 6k - 2$  и  $M = 4l - 2$  ( $k, l \in \mathbb{N}$ ). На этой территории находится  $L$  грузов и  $K$  мобильных объектов, способных перемещать грузы.

В связи с завозом партии из  $L_1$  грузов требуется переместить  $L_2 \subseteq L$  грузов в другие клетки, используя мобильные объекты. При этом все время выполнения этого задания не должно превышать предельного времени:

$$\tau \leq \tau^*, \quad (1)$$

где  $\tau^*$  – время, которое осталось до прибытия новых грузов. Если же время перемещения грузов  $\tau > \tau^*$ , необходимо модифицировать задачу, чтобы задание (1) было выполнено.

В работе [1] предложена следующая модель перемещения мобильных объектов по территории:

$$\max_{\substack{\text{tr}(G_{r_i}) \in \text{TR}(G_{r_i}) \\ \{\tau_j\}}} \frac{|\theta_\varphi|}{|L_{\text{tr}}(G_{r_i})|} \rightarrow \min_{\varphi \in \Phi}, \quad (2)$$

где  $|L_{\text{tr}}(G_{r_i})|$  – длина линии, равноудаленной от границ траектории;  $\{\tau_j\}, j \in J$  – временные зависимости.

Предложенная модель (2) показала хорошие результаты в условиях отсутствия помех на пути мобильного объекта (в том числе и других мобильных объектов). Однако в случае, когда количество мобильных объектов  $K \geq K^*$ , где  $K^*$  – некоторое предельное значение, которое зависит от размеров поля, то риском их столкновения друг с другом пренебречь нельзя. Кроме того, в большинстве случаев нельзя пренебречь и риском возникновения посторонних помех на пути мобильного объекта, поэтому модель нуждается в дополнительных исследованиях.

Кроме того, для настройки модели (2) требуется оптимизировать функцию общего вида от  $\Omega = 30$  параметров, что связано с серьезными вычислительными затратами.

В связи с этим предлагается модифицировать модель таким образом, чтобы существенно уменьшить количество настраиваемых параметров и снизить вычислительную сложность.

Таким образом, необходимо:

- модифицировать и исследовать формальную модель перемещения мобильного объекта по заданной траектории с учетом динамических помех;
- модифицировать нечеткую модель перемещения мобильного объекта с целью повышения эффективности ее настройки;
- проверить адекватность полученной модели.

## 3. Модификация формальной модели

Разработаем модель движения мобильного объекта по траектории с учетом помех.

Пусть каждая единичная клетка территории производственного помещения представляет собой квадрат  $s \times s$ , а мобильный объект является прямоугольником длиной  $a$  и шириной  $b$ , где  $b < a < s$ , причем  $2b \leq s$ .

Определим позицию клетки как пару натуральных чисел  $(n, m)$ , где  $n$  – номер клетки по счету сверху, а  $m$  – номер клетки по счету слева. Так, верхняя левая клетка имеет позицию  $(1, 1)$ , а правая нижняя – позицию  $(N, M)$ .

В работе [4] было введено разбиение клеток на 2 класса – *дороги*  $D$  и *хранилища*  $H$ . С учетом обозначений, определим следующие правила перемещения:

1) груз, не перемещаемый мобильным объектом, может находиться только в хранилище;

2) мобильный объект может находиться в клетке хранилища в том и только том случае, когда он забирает груз, расположенный в этой клетке. Во всех остальных случаях мобильные объекты перемещаются только по дорогам;

3) мобильные объекты могут перемещаться по дорогам только в определенных направлениях. Если мобильный объект проходит через клетку  $(n, m)$ , то:

– если  $n = 3k - 1$  или  $n = 3k$  для некоторого  $k \in \mathbb{N}$ , а  $m = 4l - 3$  для некоторого  $l \in \mathbb{N}$ , то мобильный объект может попасть из этой клетки только в клетку  $(n + 1, m)$ ;

– если  $n = 3k - 1$  или  $n = 3k$  для некоторого  $k \in \mathbb{N}$ , а  $m = 4l - 2$  для некоторого  $l \in \mathbb{N}$ , то мобильный объект может попасть только в клетку  $(n - 1, m)$ ;

– если  $n = 6k - 5$  для некоторого  $k \in \mathbb{N}$ , а  $m = 4l - 1$  или  $m = 4l$  для некоторого  $l \in \mathbb{N}$ , то мобильный объект может попасть только в клетку  $(n, m - 1)$ ;

– если  $n = 6k - 2$  для некоторого  $k \in \mathbb{N}$ , а  $m = 4l - 1$  или  $m = 4l$  для некоторого  $l \in \mathbb{N}$ , то мобильный объект может попасть только в клетку  $(n, m + 1)$ ;

– если  $n = 6k - 5$  для некоторого  $k \in N$ , а  $m = 4l - 3$  для некоторого  $l \in N$ , то мобильный объект может попасть либо в клетку  $(n, m - 1)$  при условии, что она существует, либо в клетку  $(n + 1, m)$ ;

– если  $n = 6k - 5$  для некоторого  $k \in N$ , а  $m = 4l - 2$  для некоторого  $l \in N$ , то мобильный объект может попасть либо в клетку  $(n, m - 1)$ , либо в клетку  $(n - 1, m)$  при условии, что она существует;

– если  $n = 6k - 2$  для некоторого  $k \in N$ , а  $m = 4l - 3$  для некоторого  $l \in N$ , то мобильный объект может попасть либо в клетку  $(n, m + 1)$ , либо в клетку  $(n + 1, m)$  при условии, что она существует;

– если  $n = 6k - 2$  для некоторого  $k \in N$ , а  $m = 4l - 2$  для некоторого  $l \in N$ , то мобильный объект может попасть либо в клетку  $(n, m + 1)$  при условии, что она существует, либо в клетку  $(n - 1, m)$ .

Схема фрагмента территории производственного помещения с указанием разрешенных направлений движения мобильных объектов приведена на рис. 1, где пунктирными стрелками указаны направления, которые разрешены тогда и только тогда, когда мобильный объект может находиться в клетке соответствующего хранилища;

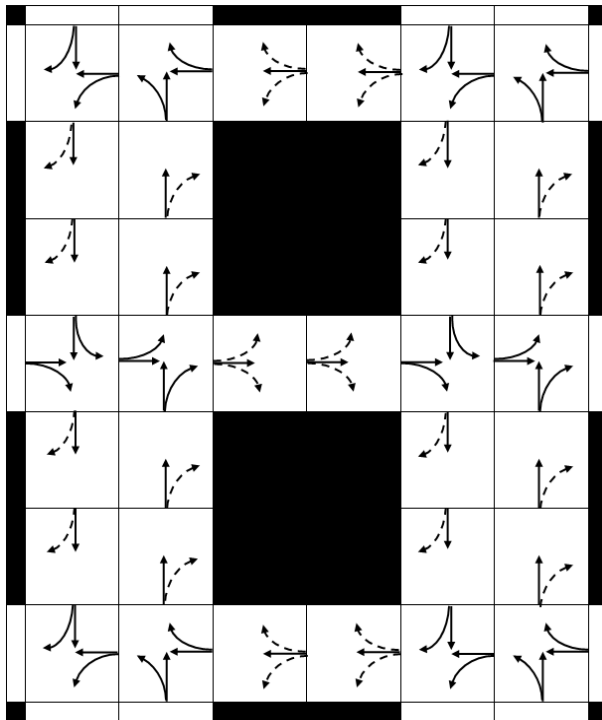


Рис. 1. Схема фрагмента территории производственного помещения

4) мобильный объект может попасть только в пустую клетку, то есть такую, с которой ни один мобильный объект не имеет общих точек. Если мобильному объекту нужно попасть в непустую клетку, ему необходимо остановиться и подождать, пока она не станет пустой;

5) расстояние от мобильного объекта до границы траектории в любой момент времени должно быть не менее  $\delta_{\min}$ , при этом гарантируется, что  $b + 2\delta_{\min} < s$  [5].

Тогда справедливо:

*Утверждение 1.* Если правила 1–5 выполняются, то при отсутствии посторонних помех движение мобильных объектов является полностью безопасным.

Действительно, правило 4 гарантирует, что мобильный объект не может столкнуться с другим мобильным объектом, а правило 5 утверждает, что столкновение мобильного объекта с границами траектории также исключено.

Однако на практике гарантировать отсутствие посторонних помех можно далеко не всегда. Так, например, если на пути движения мобильного объекта окажется мешок с мукой, куча песка, большой камень, игнорирование препятствия может привести к аварии мобильного объекта. Если же мобильный объект будет останавливаться перед препятствием вне зависимости от его размера и риска аварии, это может существенно увеличить время выполнения задания. Разумным выходом из этой ситуации представляется модификация модели перемещения мобильного объекта, позволяющая объезжать препятствия, если это возможно.

Введем систему координат с центром в левом верхнем углу поля. Направим ось  $X$  вправо, а ось  $Y$  – вниз, и введем шкалу так, чтобы размер клетки был равен единице. Тогда левый верхний угол поля будет иметь координаты  $(0, 0)$ , а правый нижний – координаты  $(M, N)$ .

Будем предполагать, что мобильный объект в каждый момент времени может определить как свое абсолютное положение, так и положение посторонних помех, а также размеры этих помех, включая высоту. Введем в рассмотрение *функцию риска*  $\rho(x, y)$ , обладающую следующими свойствами:

1) функция  $\rho(x, y)$  определена на множестве дорог  $D$ ;

2) функция  $\rho(x, y)$  может принимать значения на интервале  $[0, 1]$ , где  $\rho(x, y) = 0$  соответствует отсутствию риска столкновения с помехой при движении центра мобильного объекта через точку с координатами  $(x, y)$ , а  $\rho(x, y) = 1$  соответствует наивысшему риску аварии;

3) в случае отсутствия посторонних помех:

–  $\rho(x, y) = 1$  тогда и только тогда, когда существует такое положение мобильного объекта  $\Gamma_1$  с центром в точке  $(x, y)$ , что часть мобильного объекта выходит за пределы его траектории  $\text{tr}(G_{\Gamma_1})$ ;

–  $\rho(x, y) = 0$ , если такого положения не существует;

4) если посторонние помехи присутствуют, то функция  $\rho(x, y)$  может принимать произвольные значения на интервале  $[0, 1]$  в зависимости от близости точки  $(x, y)$  к той или иной помехе, размеров помехи, ее формы и материала.

Заметим, что точное вычисление значения функции риска в каждой точке траектории представляет собой сложную вычислительную задачу, а также требует точных измерений расстояния до помех и их габаритов, что, в свою очередь, требует установки дорогостоящего измерительного оборудования на каждый мобильный объект.

Значительно менее затратным и более универсальным методом представляется замена функции риска  $\rho(x, y)$  нечеткой функцией  $\tilde{\rho}(x, y)$  и определение нечетких термов  $\tilde{\rho}_i$  для параметра риска  $\rho$ . При этом для принятия решения о возможности дальнейшего движения мобильного объекта в точке  $(x, y)$  достаточно найти значения функций принадлежности  $\mu_i(\rho(x, y))$ , что не требует сложных вычислений.

Было принято решение выделить по 3 нечетких термина для параметра риска  $\rho$ :

«Малый риск» –  $\tilde{\rho}_1$ ,

«Средний риск» –  $\tilde{\rho}_2$ ,

«Большой риск» –  $\tilde{\rho}_3$ .

При этом было предложено использовать следующие функции принадлежности [6]:

$$\mu_1(\rho) = e^{-\rho^2/\sigma_1^2} \quad \text{для малого риска;} \quad (3)$$

$$\mu_2(\rho) = e^{-(\rho-h)^2/\sigma_2^2} \quad \text{для среднего риска;} \quad (4)$$

$$\mu_3(\rho) = e^{-(\rho-1)^2/\sigma_3^2} \quad \text{для большого риска,} \quad (5)$$

где  $\rho \in [0, 1]$  согласно свойству 2 функции риска;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – параметры крутизны, определяемые в процессе настройки модели;  $h > 0$  – параметр среднего значения, определяемый в процессе настройки модели.

Пусть мобильный объект способен вычислять значения функций принадлежности (3)–(5) в любой точке своей траектории.

Заметим, что если значение функции принадлежности  $\mu_2$  или  $\mu_3$  в точке  $\rho(x, y)$  достаточно велико, то движение мобильного объекта через эту точку рискованно.

Если же эти значения малы, то риском можно пренебречь.

Пусть  $\mu^*$  – некоторое предельное значение функции принадлежности, такое, что если

$$\mu_i(\rho(x, y)) < \mu^*,$$

то значение  $\mu_i(\rho(x, y))$  считается пренебрежимо малым.

Тогда можно ввести следующее правило: риск аварии мобильного объекта в точке  $(x, y)$  мал, если

$$\mu_1(\rho(x, y)) \geq \mu^* \wedge \mu_2(\rho(x, y)) < \mu^* \wedge \mu_3(\rho(x, y)) < \mu^*. \quad (6)$$

Пусть  $\Theta$  – множество точек  $(x, y) \in \text{tr}(G_{\Gamma_1})$ , в которых условие (6) выполняется, а  $\bar{\Theta} = \Theta / \text{tr}(G_{\Gamma_1})$  – множество точек, в котором условие (6) не выполняется. Тогда оптимальная траектория  $L_{\text{tr}}$  мобильного объекта  $\Gamma_1$  может быть определена как линия, равноудаленная от границ множества  $\Theta$ .

На рис. 2 приведен пример оптимальной траектории мобильного объекта на фрагменте территории производственного помещения без помех. Здесь множество  $\bar{\Theta}$  обозначено темно-серым цветом.

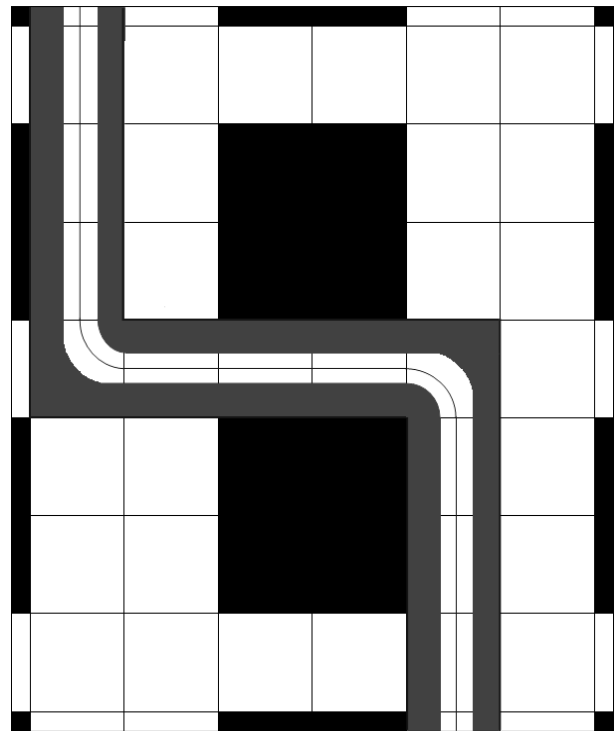


Рис. 2. Определение оптимальной траектории мобильного объекта в случае отсутствия помех

На рис. 3 приведен пример оптимальной траектории мобильного объекта на фрагменте территории с помехами.

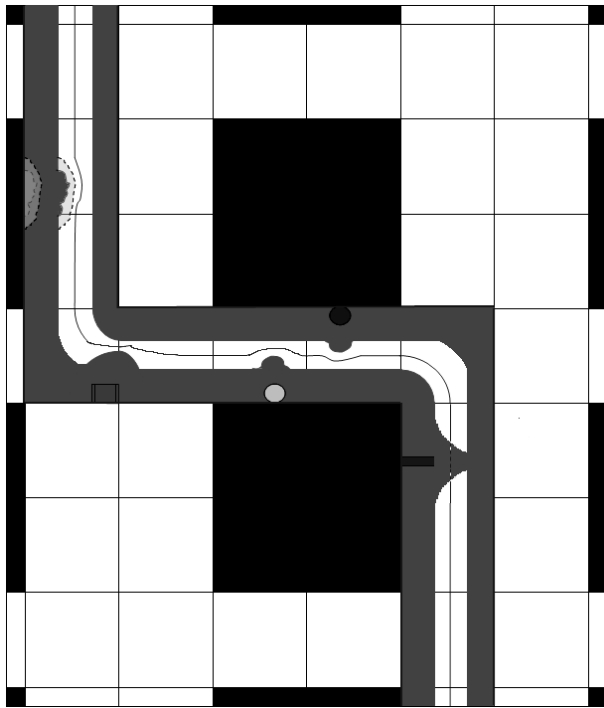


Рис. 3. Определение оптимальной траектории мобильного объекта в случае наличия помех

Как видно из рисунка, множество  $\Theta$  несвязно, поэтому линия  $L_{tr}$  не является непрерывной.

Заметим, что в случае наличия помех линия  $L_{tr}$  может изменяться с течением времени, поэтому ее длина не может быть вычислена однозначно и нечеткую модель (2) необходимо модифицировать.

Пусть  $\{d_{r_i}^{(1)}, d_{r_i}^{(2)}, \dots, d_{r_i}^{(T)}\}$  – последовательность смещений центра мобильного объекта  $r_i$  относительно линии  $L_{tr}$  при движении мобильного объекта из начальной клетки в конечную, измеренных с интервалом  $\tau_{min}$  [1].

Тогда задача оптимизации перемещения мобильного объекта может быть сформулирована как задача минимизации среднего смещения относительно оптимальной траектории:

$$D_{cp} = \sum_{k=1}^T |d_{r_i}^{(k)}| / T \rightarrow \min_{\substack{\varphi \in \Phi \\ tr(G_{r_i}) \in TR(G_{r_i}) \\ \{\tau_j\}}} \quad , \quad (7)$$

где  $TR(G_{r_i})$  – множество возможных траекторий мобильного объекта  $r_i$ ;  $T$  – длина последовательности  $\{d_{r_i}^{(k)}\}; \{\tau_j\}, j \in J$  – временные зависимости.

Можно показать, что для настройки модели (7) можно применить те же методы, что и для настройки модели (2).

#### 4. Модификация методов настройки нечеткой модели

В работе [7] задача настройки нечеткой модели (2) была сведена к задаче оптимизации функции  $y^F(W, P)$  от 30 переменных, из которых  $|W| = 18$  – веса правил продукции, а  $|P| = 12$  – параметры функций принадлежности нечетких термов.

Поскольку функция  $y^F(X)$  не является дифференцируемой на рассматриваемом интервале, для ее оптимизации градиентные методы неприменимы.

Поэтому был предложен метод сверхбыстрого отжига [7] – вероятностный метод, который при правильной настройке параметров достаточно быстро сходится к субоптимальному ответу.

Однако в случае оптимизации многопараметрических функций настройка параметров метода представляет собой весьма трудоемкий процесс. В связи с этим сокращение количества параметров целевой функции способно существенно упростить настройку метода и повысить его качество.

Среди параметров функций принадлежности предлагалось настраивать средние значения  $h_{\tilde{d}_2}, h_{\tilde{\alpha}_2}, h_{\tilde{\omega}_2}$  для нечетких термов «среднее отрицательное смещение», «средний отрицательный угол поворота» и «средняя отрицательная угловая скорость» соответственно, а также коэффициенты крутизны  $\sigma_{\tilde{d}_1}, \sigma_{\tilde{d}_2}, \sigma_{\tilde{d}_3}, \sigma_{\tilde{\alpha}_1}, \sigma_{\tilde{\alpha}_2}, \sigma_{\tilde{\alpha}_3}, \sigma_{\tilde{\omega}_1}, \sigma_{\tilde{\omega}_2}, \sigma_{\tilde{\omega}_3}$  для нечетких термов «большое отрицательное смещение», «среднее отрицательное смещение», «малое отрицательное смещение», «большой отрицательный угол поворота», «средний отрицательный угол поворота», «малый отрицательный угол поворота», «большая отрицательная угловая скорость», «средняя отрицательная угловая скорость» и «малая отрицательная угловая скорость» соответственно (аналогичные положительные значения предполагалось брать симметрично).

Заметим, что средние значения не должны сильно отличаться от середины рассматриваемого интервала, поэтому адекватным решением представляется зафиксировать значения

$$h_{\tilde{d}_2} = h_{\tilde{\alpha}_2} = h_{\tilde{\omega}_2} = -0.5$$

(и, соответственно, для положительных термов

$$h_{\tilde{d}_5} = h_{\tilde{\alpha}_5} = h_{\tilde{\omega}_5} = 0.5).$$

Зафиксировать значения коэффициентов крутизны без затратных дополнительных исследований

не представляється возможным, однако определить интервалы, в которых могут изменяться эти коэффициенты, значительно проще.

Пусть  $\sigma_{\tilde{k}_i} \in [\underline{\sigma}_{\tilde{k}_i}; \overline{\sigma}_{\tilde{k}_i}]$  для всех нечетких термов  $\tilde{k}_i$ .

Тогда вместо функций принадлежности  $\mu_{\tilde{k}_i}(x)$  можно рассматривать интервальные функции принадлежности

$$\mu_{\tilde{k}_i}'(x) = [\underline{\mu}_{\tilde{k}_i}(x), \overline{\mu}_{\tilde{k}_i}(x)], \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_{\tilde{k}_i}(x) &= \\ &= \begin{cases} \exp\left[-\frac{(x - h_{\tilde{k}_i})^2}{2 \cdot \underline{\sigma}_{\tilde{k}_i}^2}\right], & x \in [x_{\min}, x_{\max}], \\ 0, & x \notin [x_{\min}, x_{\max}], \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

и

$$\begin{aligned} \overline{\mu}_{\tilde{k}_i}(x) &= \\ &= \begin{cases} \exp\left[-\frac{(x - h_{\tilde{k}_i})^2}{2 \cdot \overline{\sigma}_{\tilde{k}_i}^2}\right], & x \in [x_{\min}, x_{\max}], \\ 0, & x \notin [x_{\min}, x_{\max}], \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

нижняя и верхняя границы интервальной функции принадлежности  $\mu_{\tilde{k}_i}'(x)$  соответственно.

На рис. 4 приведен пример построения интервальных функций принадлежности для всех нечетких термов одного из параметров.

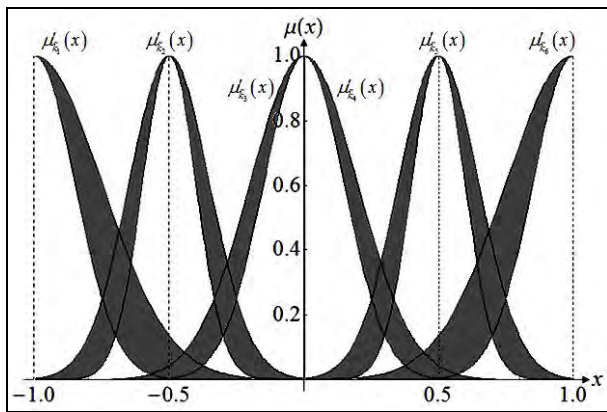


Рис. 4. Пример построения интервальных функций принадлежности

Заметим, что значение функции принадлежности  $\mu_{\tilde{k}_i}'(x)$  в произвольной точке  $x_0 \in [x_{\min}, x_{\max}]$  представляет собой не число, а интервал  $[\underline{\mu}_{\tilde{k}_i}(x_0), \overline{\mu}_{\tilde{k}_i}(x_0)]$ .

В связи с этим предлагается брать в качестве значения середину интервала:

$$\mu_{\tilde{k}_i}'^{(cp)}(x_0) = \frac{\underline{\mu}_{\tilde{k}_i}(x_0) + \overline{\mu}_{\tilde{k}_i}(x_0)}{2}. \quad (11)$$

Тогда справедливо:

*Утверждение 2.* Если задана целевая функция

$$y^F(W, P),$$

для которой параметры

$$h_{\tilde{k}_i} = \text{const}, \text{ а } \sigma_{\tilde{k}_i} \in [\underline{\sigma}_{\tilde{k}_i}; \overline{\sigma}_{\tilde{k}_i}],$$

где  $\underline{\sigma}_{\tilde{k}_i}, \overline{\sigma}_{\tilde{k}_i}$  – также некоторые константы, то функции принадлежности нечетких термов можно задать в виде (8) – (10) и свести задачу к оптимизации функции  $y^{\tilde{F}}(W)$ .

Действительно, для настройки параметров полученной нечеткой модели  $\tilde{F} = \tilde{F}(W)$ , которая является моделью типа 2 [8–9], достаточно оптимизировать функцию  $y^{\tilde{F}}(W)$  от  $|W| = 18$  переменных, что позволяет значительно снизить затраты ресурсов при настройке модели.

## 5. Адекватность модели в практических приложениях

Чтобы проверить адекватность модели (7), было принято решение разработать оконное приложение, симулирующее перемещение мобильных объектов при различных значениях параметров  $N, M, K$  и  $L$  согласно этой модели.

В качестве критериев адекватности модели предлагаются:

– значение целевой функции (7)

$$D_{cp} \leq 0,1m; \quad (12)$$

– максимальное время выполнения задания

$$\theta_{\max} = T \cdot \tau_{\min} \leq \tau^*, \text{ где } \tau^* = 20 \text{ мин}, \quad (13)$$

для всех возможных входных параметров.

Кроме того, для удобства симуляции и измерения качества модели было решено выделить один мобильный объект, параметры которого (его начальное и конечное положение, а также положение груза, который этот мобильный объект должен переместить) задаются пользователем. Положения остальных мобильных объектов и грузов при этом генерируются случайным образом. Это позволяет, с одной стороны, не задавать большое количество параметров, а с другой – адекватно симулировать движение выделенного мобильного объекта в случайном потоке.

На рис. 5 приведен пример симуляции перемещения мобильных объектов при  $N = M = 10, K = 10$  и  $L = 14$ .

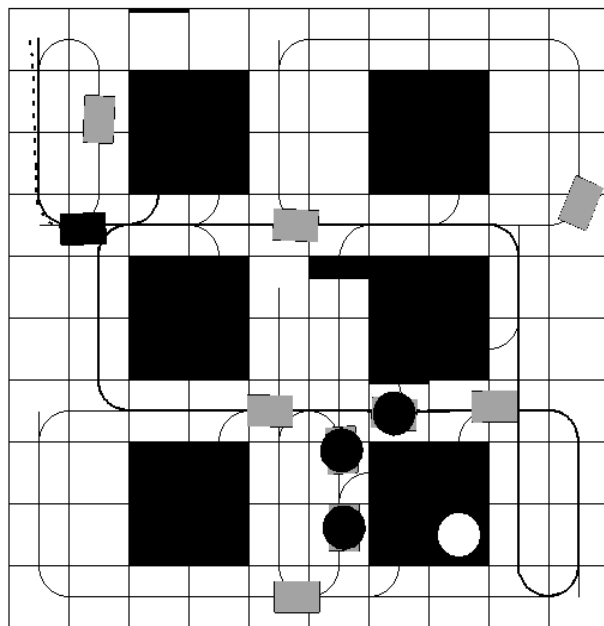


Рис. 5. Пример симуляции перемещения мобильных объектов

Здесь прямоугольниками одинакового размера обозначены мобильные объекты, кругами – грузы, темными прямоугольниками на границах клеток – помехи, сплошными линиями – оптимальные траектории мобильных объектов, а пунктирной линией – реальная траектория движения выделенного мобильного объекта.

В результате симуляции перемещения при различных значениях параметров  $N$ ,  $M$ ,  $K$  и  $L$  было получено, что  $D_{cp} \leq 0,065 \cdot s$ , а  $\theta_{max} = 6$  мин.

Полагая размер единичной клетки равным  $s = 1,15$  м [5], получим

$$D_{cp} \leq 0,075 \text{ м}, \quad (14)$$

что удовлетворяет условию (12), а значит, модель (7) является адекватной.

Заметим, что хотя симуляция процесса перемещения мобильных объектов является простым и наглядным способом проверки адекватности модели, его применение при больших значениях параметров затруднительно. Оценим максимальные значения параметров, при которых применение метода симуляции перемещения мобильных объектов для проверки адекватности модели оправдано. Основным фактором при оценке этих значений представляется время работы приложения – если симуляция будет слишком долгой (более 20 минут), то ее применение будет неэффективным.

На рисунке 6 приведен график зависимости среднего времени  $t$  работы программы, симулирующей перемещение мобильных объектов согласно модели (7), от площади  $N \times M$  производственного помещения при количестве мобильных объектов  $K = 10$ .

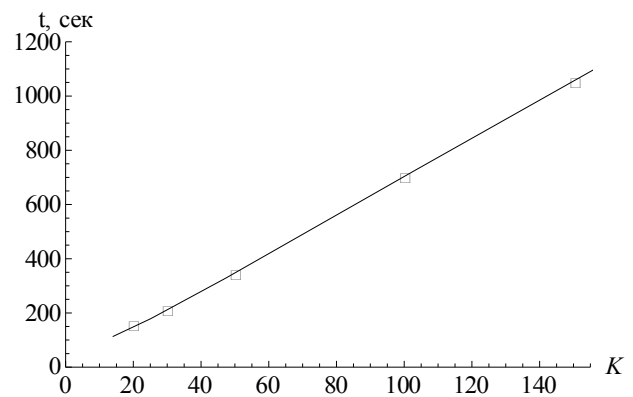


Рис. 6. График зависимости времени симуляции перемещения мобильных объектов (в секундах) от площади помещения

Как видно из графика, время симуляции сублинейно зависит от площади помещения. Это можно объяснить тем, что средняя длина траектории мобильного объекта пропорциональна  $N + M$ , а с линейным приростом параметров  $N$  и  $M$  площадь поля растет сверхлинейно.

Таким образом, при фиксированном количестве мобильных объектов увеличение размеров поля не оказывает большого влияния на время работы приложения.

Однако при увеличении количества  $K$  мобильных объектов на поле время симуляции растет линейно (рис. 7).

Это объясняется тем, что для каждого из мобильных объектов необходимо произвести измерения и определить направление дальнейшего движения, что является наиболее трудоемким этапом. При этом легко показать, что количество  $L$  грузов практически не влияет на время симуляции.

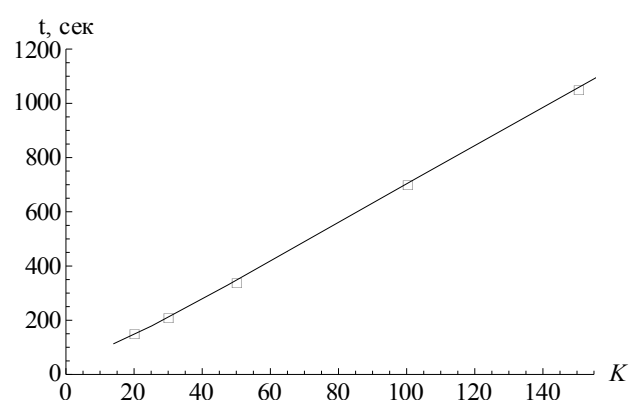


Рис. 7. График зависимости времени симуляции перемещения мобильных объектов от количества мобильных объектов при  $N = M = 22$

Из графика видно, что при  $N = M = 22$  и  $K = 150$  время симуляции достигает почти 20 минут, поэтому дальнейшее увеличение количества мобильных объектов нецелесообразно.

Таким образом, модель (7) можно считать адекватной при следующих ограничениях:  $N \leq 22$ ,  $M \leq 22$ ,  $K \leq 150$ . При больших значениях параметров для проверки адекватности модели требуются дополнительные исследования.

Полученные результаты исследований, как следует из материалов статьи, обладают научной новизной и практической значимостью. Основные положения работы внедрены в интеллектуальных технологиях распределенной системы приборостроительных производств.

### Выводы

1. Выполнен содержательный анализ существующих моделей и методов решения аналогичных задач, сформулирована постановка задачи исследования.

2. Определены точностные показатели модели. Модифицирована формальная модель перемещения мобильного объекта по заданной траектории с учетом помех. Подтверждена эффективность подхода.

3. С целью повышения эффективности настройки нечеткой модели выполнена модификация нечетких процессов, представленных интервальными функциями принадлежности.

4. Разработаны критерии адекватности модели объекта. Выполнена проверка функционирования полученной модели, подтвердившая адекватность модели и процессов.

5. Результаты работы внедрены в интеллектуальных технологиях распределенной системы приборостроительных производств.

6. Результаты работы обладают перспективами дальнейших исследований и внедрений в интеллектуальных технологиях.

### Список литературы

1. Kucherenko Ye.I. Fuzzy models in problems of complex systems control / Ye.I. Kucherenko, O.D. Driuk // *Radioelectronics, informatics, control.* – №1, 2014. – P. 69–74.
2. Harisha S.K. Fuzzy Logic Reasoning to Control Mobile Robot on Pre-defined Strip Path / S.K. Harisha, K.P. Ramkanth, M. Krishna, S.C. Sharma // *World Academy of Science, Engineering and Technology.* – Vol. 42, 2008. – P. 642–646.
3. Boubertakh H. A new mobile robot navigation method using fuzzy logic and a modified Q-learning algorithm / H. Boubertakh, M. Tadjine, P.-Y. Glorennec // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems.* – Vol. 21, №1–2, 2010. – P. 113–119.
4. Кучеренко Е.И. Стохастические модели и методы субоптимальной маршрутизации сложных объектов [Текст] / Е.И. Кучеренко, А.Д. Дрюк // *Бионика интеллекта.* – №1 (80), 2013. – С. 45–53.
5. Hasan N. Sub-optimal automatic generation control of interconnected power system using constrained feedback control strategy / N. Hasan, Ibraheem, P. Kumar, Nizamuddin // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems.* – Vol. 43, 2012. – P. 295–303.
6. Gupta N. Comparative Analysis of Fuzzy Power System Stabilizer Using Different Membership Functions / N. Gupta, S.K. Jain // *International Journal of Computer and Electrical Engineering.* – 2010. – Vol. 2, №2, – P. 262–267.
7. Кучеренко Е.И. Расширение методов интеллектуального управления сложными объектами [Текст] / Е.И. Кучеренко, А.Д. Дрюк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – № 4/3 (70), 2014. – С. 13–17.
8. Castillo O. Recent Advances in Interval Type-2 Fuzzy Systems / O. Castillo, P. Melin. – Springer, 2012. – 90 p.
9. Rutkowski L. Computational intelligence – methods and techniques / L. Rutkowski. – Springer, 2008. – 514 p.

Поступила в редколлегию 10.02.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Е.В. Бодянский, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### РОЗШИРЕННЯ НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ ОБ'ЄКТОМ

Є.І. Кучеренко, О.Д. Дрюк

У роботі виконано змістовний аналіз існуючих моделей та методів розв'язання задач оптимального керування мобільними об'єктами. Модифіковано формальну модель пересування мобільного об'єкта за заданою траєкторією з урахуванням перешкод. Визначено точнісні показники моделі. Підтверджено ефективність підходу. З метою підвищення ефективності налаштування нечіткої моделі виконано модифікацію нечітких процесів, що представлені інтервальними функціями належності. Розроблено критерії адекватності моделі об'єкта. Виконано перевірку функціонування отриманої моделі, що підтвердила адекватність моделі та процесів.

**Ключові слова:** мобільний об'єкт, нечітка логіка, траєкторія, перешкода, оптимізація, функція ризику, модель типу 2.

### EXPANSION OF FUZZY MODEL OF MOBILE OBJECT CONTROL PROCESSES

Ye.I. Kucherenko, O.D. Driuk

In the paper, a content analysis of existing models and methods of solving the problems of optimal mobile objects control is performed. A formal model of mobile object movement along a predetermined path is modified, considering appearance of obstacles. Precision parameters of the model are defined, confirmed the effectiveness of the approach. In order to increase the effectiveness of fuzzy model tuning, performed the modification of fuzzy processes represented by interval membership functions. Criteria for the object model adequacy are developed. The received model is verified; the adequacy of the model and processes is confirmed.

**Keywords:** mobile object, fuzzy logic, trajectory, obstacle, optimization, risk function, type-2 model.