

УДК 681.51

Определение координат транспортного объекта при дефиците сигналов с помощью модели нечеткого вывода Такаги — Сугено

- Фоменко Юлия Сергеевна**¹ — аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, нечеткие интеллектуальные системы, системы искусственного интеллекта. E-mail: yu.srgvn@gmail.com
- Хомоненко Анатолий Дмитриевич**^{1,2} — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы»; профессор кафедры «Математическое и программное обеспечение». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Для цитирования: Фоменко Ю. С., Хомоненко А. Д. Определение координат транспортного объекта при дефиците сигналов с помощью модели нечеткого вывода Такаги — Сугено // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 46–55. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-46-55

Аннотация. Актуальность задач определения координат транспортных объектов в режиме реального времени возрастает в условиях информационной «слепоты», когда традиционные методы навигации становятся недоступными. Особую значимость это приобретает на железнодорожном транспорте, где ошибки в позиционировании могут привести к катастрофическим последствиям.

Цель: разработка алгоритма на основе нечеткого вывода Такаги — Сугено для повышения точности и надежности определения координат транспортных объектов в условиях дефицита данных. **Методы:** предложена адаптивная модель, интегрирующая нечеткую логику для обработки неполных и противоречивых сигналов. Алгоритм реализует многоуровневый анализ данных с учетом динамики движения и внешних помех для критических участков инфраструктуры. **Результаты:** проведены компьютерные эксперименты применительно к участкам железнодорожных путей с ограниченным числом датчиков. Разработаны рекомендации по использованию алгоритма для поддержки принятия решений. **Обсуждение:** доказана эффективность применения нечеткой логики для компенсации информационной «слепоты». Обозначены перспективы внедрения алгоритма в системы безопасности и диспетчеризации, а также необходимость дальнейшей оптимизации вычислительной сложности для высокоскоростных объектов.

Ключевые слова: идентификация, координаты объекта, транспортные объекты, алгоритм Такаги — Сугено, информационная «слепота», безопасность движения

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

Современные системы управления транспортными потоками требуют высокоточного мониторинга местоположения объектов в режиме реального времени. На железнодорожном транспорте эта задача сопряжена с уникальными вызовами: ограниченная видимость, нестабильность датчиков, кибератаки на инфраструктуру и возникающая вследствие этого информационная «слепота» — состояние, при котором система теряет доступ к критически важным данным. Традиционные навигационные методы, включая GPS и RFID, в таких условиях демонстрируют снижение надежности, повышая риски аварий, столкновений и несанкционированного вмешательства.

Актуальность точного позиционирования обусловлена его ролью в обеспечении безопасности и оптимизации процессов. Определение координат транспортных средств в реальном времени позволяет:

- отслеживать их местоположение на карте при выполнении перевозок;
- реализовывать диспетчерское управление, предотвращать столкновения, корректировать маршруты;
- контролировать движение высокоскоростных поездов в условиях плотного трафика, тоннелей и сортировочных станций.

Особую значимость задача приобретает в контексте предотвращения аварийных ситуаций, где даже погрешность в 1–2 метра для высокоскоростного состава может привести к нарушению графика или чрезвычайному происшествию. Несмотря на многочисленные исследования в этой области, разработка систем, устойчивых к информационным помехам и дефициту сигналов, остается нерешенной проблемой.

Существующие подходы, включая статистические методы и нейросетевые алгоритмы, часто требуют значительных объемов данных и недостаточно адаптированы к условиям неопределенности. В качестве альтернативы предлагается использование нечеткой логики, в частности модели Такаги — Сугено, которая способна формализовать экспертные знания о динамике транспортных систем и эффективно об-

рабатывать неточные сигналы. Целью исследования является разработка алгоритма на ее основе, способного восстанавливать координаты объектов при частичной потере данных, что позволит повысить отказоустойчивость систем управления.

Системы и технологии определения координат в режиме реального времени

Для определения координат транспортного средства в режиме реального времени можно использовать следующие технологии и системы:

1. GPS (глобальная навигационная спутниковая система): это наиболее распространенный способ определения местоположения. GPS-датчики устанавливаются на транспортные средства и передают координаты (широту и долготу) на сервер или мобильное устройство [1–3].

2. ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система) — это российская спутниковая система, аналогичная GPS, которая позволяет определять координаты объектов на Земле. Она может быть использована для отслеживания транспортных средств в режиме реального времени [4].

3. GSM (глобальная система мобильной связи) и GPRS (общий пакетный радиосервис) могут использоваться для определения координат транспортного средства и передачи этой информации на стационарный пункт.

4. Интернет вещей (IoT) [5, 6] активно используется для определения координат транспортных средств, что позволяет улучшить управление логистикой, повысить безопасность и оптимизировать маршруты.

5. RFID (Radio Frequency Identification) — беспроводная коммуникационная технология, которая использует радиоволны для автоматической идентификации помеченных объектов или вещей [7].

6. Поддержка принятия решения на основе нечеткого вывода — мощный инструмент определения координат транспортного объекта в условиях информационной «слепоты».

Сравнительная характеристика технологий представлена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика систем и технологий определения координат объектов

Система	Принцип работы	Требуемое оборудование	Программное обеспечение	Область применения	Преимущества	Недостатки
GPS	Приемник GPS определяет местоположение, принимая сигналы от нескольких спутников	GPS-навигаторы; смартфоны с GPS-модулями	Программное обеспечение для навигации, например Google Maps	Автотранспорт; авиация; морской транспорт и др.	Точность	Сложности с работой на территории России
ГЛОНАСС	Спутники передают сигналы приемникам на объекте	Спутник; приемник на объекте; модуль передачи данных	Программное обеспечение для мониторинга, анализа маршрутов и скоростей	Логистика и транспорт; пассажирские перевозки; сельское хозяйство и др.	Точность; доступность на территории России; интеграция с другими системами	Необходимость синхронизации с другими системами
GSM/GPRS	GPS-трекер совмещает GNSS-приемник и GSM-модуль. Определяет координаты, скорость движения и передает данные через GPRS-канал сотовой связи	Стационарное или мобильное оборудование для систем GPS-трекинга	Широкий спектр приложений для трекинга объектов	Логистика и транспорт; пассажирские перевозки; сельское хозяйство и др.	Широкое покрытие	Плохое качество сигнала в удаленных регионах; потенциальные проблемы с безопасностью данных, передаваемых по Сети
Интернет вещей (IoT)	Связывание устройств через интернет для сбора и передачи данных	GPS-трекеры; сенсоры	Облачные платформы для обработки и анализа данных	Мониторинг активов; оптимизация процессов; безопасность	Возможность подключения к другим устройствам IoT; автоматизация процессов	Зависимость от качества интернета; потребность в большом объеме данных
RFID	RFID-метки (теги) бывают активными (с батареей) и пассивными (питаются от считывателя). Считыватель получает данные метки при ее нахождении в зоне действия	Метки (теги); считыватели	Специализированное ПО для управления RFID-системами	Управление доступом к объектам; инвентаризация товаров; контроль доступа персонала	Простота внедрения и использования; возможность автоматической идентификации объектов	Ограниченный диапазон действия считывателей; затраты на внедрение и поддержку
Принятие решений на основе нечеткого вывода	Анализ текущей обстановки системой нечеткого вывода на основе обширной базы знаний	Компьютеры с поддержкой нечеткого вывода; база знаний	Программное обеспечение для управления правилами нечеткого вывода	Транспортировка грузов; управление активами; мониторинг событий	Работает при недостатке данных; настройка правил «на лету»; совместимость со сторонними системами	Большой объем данных для формирования базы знаний; сложность в разработке и настройке

Определение координат объекта на основе нечеткого вывода

Принятие решения на основе нечеткого вывода [8–10] может успешно применяться для определения координат транспортного объекта, особенно в условиях неопределенности и неполной информации. Основные преимущества применения нечеткого вывода:

1. Возможность работы в условиях информационной «слепоты»

Нечеткая логика позволяет работать с неопределенными и размытыми данными. В отличие от других систем определения координат, где значения принимают четкие значения, нечеткая логика позволяет использовать промежуточные значения, что делает ее более подходящей для реальных сценариев, где данные могут быть неточными.

2. Разнородность входных данных

Система может принимать различные входные данные, такие как:

- данные GPS (координаты, скорость, направление движения);
- данные от сенсоров (например, уровень топлива, состояние дороги);
- информация о погодных условиях;
- данные о трафике (загруженность дорог, наличие аварий).

3. Возможность формулирования условий в виде нечетких правил

Система принятия решения строится на базе нечетких правил для принятия решений.

4. Результат принятия решения представлен в виде нечеткого вывода

Поскольку для формирования базы знаний используются нечеткие правила, результат представляется в виде нечеткого вывода. Например, если транспортное средство следует к зоне с высокой вероятностью загрузки пути следования, то система может рекомендовать альтернативный маршрут.

5. Взаимозаменяемость смежных систем

Например:

- если GPS-сигнал слабый, система может использовать данные от других сенсоров (например, акселерометры) для более точного определения местоположения;

- если транспортное средство движется по сложной местности (например, в горах или в городских условиях с высокими зданиями), нечеткая логика может помочь оценить возможные ошибки в определении координат.

6. Выводы

На основе анализа данных и нечетких правил система может предоставлять рекомендации:

- оптимизация маршрута с учетом текущих условий;
- рекомендации по остановкам (например, для заправки или отдыха);
- оценка рисков и предупреждения о потенциальных проблемах на маршруте.

Таким образом, система поддержки принятия решения на основе нечеткого вывода может значительно повысить точность и надежность определения координат транспортного средства, особенно в условиях неопределенности.

Математическая модель алгоритма Такаги — Сугено

Модель Такаги — Сугено может быть использована для определения координат транспортного средства, например в задачах навигации или управления движением. В этом случае модель строится на основе нечетких правил, которые связывают входные данные с выходными данными.

Выбор алгоритма нечеткого вывода Такаги — Сугено [11] обусловлен проведенным анализом сравнения с алгоритмом Мамдани [9, 10], результаты которого представлены в табл. 2.

Обобщенное математическое представление алгоритма Такаги — Сугено имеет следующий вид:

1. Нечеткие правила

Модель Такаги — Сугено состоит из набора нечетких правил, которые имеют следующее математическое представление:

Если x_1 есть A_1 и x_2 есть A_2 и ... и x_n есть A_n ,
то $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,

где x_1, x_2, \dots, x_n — входные переменные;

A_1, A_2, \dots, A_n — нечеткие множества;

y — выходная переменная;

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — линейная функция входных переменных.

**Сравнительная таблица характеристик алгоритмов нечеткого вывода
Мамдани и Такаги — Сугено**

Характеристика	Такаги — Сугено	Мамдани
Вычислительная сложность	Низкая (нет дефаззификации)	Высокая (требуется дефаззификация)
Точность	Высокая (линейные зависимости)	Среднее (нечеткие множества)
Адаптивность	Высокая (подходит для сложных систем)	Ограниченная
Настройка	Относительно простая (меньшая зависимость от экспертов)	Сложная (требуется обширная экспертная оценка)
Применение	Управление, прогнозирование	Экспертные системы, диагностика
Масштабируемость	Высокая	Ограниченная

2. Линейная функция в заключении

В модели Такаги — Сугено заключение правила представляет собой линейную функцию входных переменных:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n,$$

где a_0, a_1, \dots, a_n — коэффициенты, характеризующие термы каждого нечеткого множества модели.

3. Агрегация выходов

Для каждого правила вычисляется степень его активации, w_n , на основе функций принадлежности:

$$w = \mu_{A_1}(x_1)\mu_{A_2}(x_2)\dots\mu_{A_n}(x_n),$$

где $\mu_{A_j}(x_j)$ — значение функции принадлежности для входной переменной x_j .

4. Итоговый выход модели

Итоговый выход модели Такаги — Сугено вычисляется как взвешенная сумма выходов всех правил:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i y_i}{\sum_{i=1}^N w_i},$$

где N — количество правил;
 w_i — степень активации i -го правила;
 y_i — выход i -го правила.

Преимущество данной модели заключается в:

- простоте интерпретации благодаря линейным функциям в заключении;
- возможности аппроксимации сложных нелинейных систем;
- эффективности в задачах управления и прогнозирования;

- широком применении в системах управления, идентификации систем, где требуется высокая точность и интерпретируемость.

Рассмотрим модель Такаги — Сугено для определения координат транспортного средства (поезда) в масштабах реального времени на основе количественных и качественных входных (скорость, угол поворота, ускорение/замедление, положение поезда на пути, наклон пути, тормозной путь, время реакции системы, целевая скорость, состояние пути и внешние условия) и выходных (координаты транспортного средства) данных.

1. Входные переменные

Пусть входными переменными являются:

- v — текущая скорость поезда — используется для оценки динамики движения и принятия решений о торможении или ускорении;
- θ — угол поворота;
- α — текущее ускорение или замедление — позволят учитывать изменение скорости и прогнозировать будущее состояние.

2. Нечеткие правила

Модель состоит из набора нечетких правил, которые описывают, как совокупность входных переменных влияет на изменение координат:

Если v есть A_i и θ есть B_j и α есть C_k ,
 то $\Delta x = f_{ij}^x(v, \theta, \alpha)$, $\Delta y = f_{ij}^y(v, \theta, \alpha)$,

где A_i, B_j, C_k — нечеткие множества для входных переменных;

$\Delta x, \Delta y$ — изменение координат транспортного средства;

f_{ij}^x, f_{ij}^y — линейные функции, описывающие изменение координат.

3. Линейные функции заключения

В модели Такаги — Сугено функции f_{ij}^x и f_{ij}^y являются линейными:

$$f_{ij}^x = a_{ij}^x + b_{ij}^x v + c_{ij}^x \theta + d_{ij}^x \alpha;$$

$$f_{ij}^y = a_{ij}^y + b_{ij}^y v + c_{ij}^y \theta + d_{ij}^y \alpha,$$

где $a_{ij}^x, b_{ij}^x, c_{ij}^x, d_{ij}^x, a_{ij}^y, b_{ij}^y, c_{ij}^y, d_{ij}^y$ — коэффициенты, характеризующие термы каждого нечеткого множества.

4. Степень активации правил

Для каждого правила вычисляется степень его активации w_{ij} на основе функций принадлежности:

$$w_{ij} = \mu_{A_i}(v) \mu_{B_j}(\theta) \mu_{C_k}(\alpha),$$

где $\mu_{A_i}(v), \mu_{B_j}(\theta), \mu_{C_k}(\alpha)$ — значение функций принадлежности для входных переменных.

5. Итоговое измерение координат

Итоговое измерение координат вычисляется как взвешенная сумма выходов всех правил:

$$\Delta x = \frac{\sum_{ijk} w_{ij} j \Delta x_{ij}}{\sum_{ijk} w_{ij}};$$

$$\Delta y = \frac{\sum_{ijk} w_{ij} j \Delta y_{ij}}{\sum_{ijk} w_{ij}}.$$

6. Обновление координат

Координаты транспортного средства обновляются на каждом шаге времени:

$$x(t+1) = x(t) + \Delta x,$$

$$y(t+1) = y(t) + \Delta y.$$

Преимущества выбора данной модели как основной для поддержки принятия решения заключаются в следующем:

- возможности учета нелинейных зависимостей в движении поезда;
- возможности адаптации к различным условиям движения (прямые участки, кривые, подъемы, спуски) и воздействия негативных факторов (метель, ураган, смерч и т. д.);
- оптимизации движения за счет минимизирования энергопотребления и времени в пути;
- простоте интерпретации и настройки модели.

Пример расчета координат движения поезда с использованием модели Такаги — Сугено на основе трех основных характеристик движения

Рассмотрим пример расчета координат движения поезда с использованием модели Такаги — Сугено. Для примера будем использовать координаты, описанные выше: скорость поезда (v), угол поворота (θ) и текущее ускорение/замедление (α).

1. Определение входных и выходных переменных

Входные переменные:

- скорость (v): от 0 до 10 км/ч;
- угол поворота (θ): от -30° до 30° .
- текущее ускорение/замедление (α): от -5 м/с² до 5 м/с².

Выходные переменные:

- изменение координаты Δx ;
- изменение координаты Δy .

2. Функции принадлежности

Для скорости:

- «Малая» (0–40 км/ч).
- «Средняя» (30–70 км/ч).
- «Высокая» (60–100 км/ч).

Для угла поворота:

- «Малый» (-30° – 0°).
- «Средний» (-15° – 15°).
- «Большой» (0° – 30°).

Для ускорения/замедления:

- Отрицательное (-5 – 0 м/с²).
- Нулевое ($-2,5$ – $2,5$ м/с²).
- Положительно (0 – 5 м/с²).

3. Нечеткие правила

• Правило 1: если v есть «Малая» и θ есть «Малый», и α есть «Отрицательная», то $\Delta x = 0,1 v + 0,05 \theta + 0,05 \alpha$, $\Delta y = 0,05 v + 0,1 \theta + 0,01 \alpha$.

• Правило 2: если v есть «Средняя» и θ есть «Средний», и α есть «Нулевое», то $\Delta x = 0,15 v + 0,1 \theta + 0,03 \alpha$, $\Delta y = 0,1 v + 0,15 \theta + 0,02 \alpha$.

• Правило 3: если v есть «Высокая» и θ есть «Большой», и α есть «Положительное», то $\Delta x = 0,2 v + 0,15 \theta + 0,05 \alpha$, $\Delta y = 0,15 v + 0,2 \theta + 0,03 \alpha$.

4. Пример входных данных

- скорость v : 50 км/ч;
- угол поворота θ : 10° ;
- ускорение/замедление α : 2 м/с².

5. Расчет степени активации правил

Для скорости 50 км/ч:

- принадлежность к «Малая»: 0,0;
- принадлежность к «Средняя»: 1,0;
- принадлежность к «Высокая»: 0,0.

Для угла 10°:

- принадлежность к «Малый»: 0,0;
- принадлежность к «Средний»: 1,0;
- принадлежность к «Большой»: 0,0.

Для ускорения 2 м/с²:

- принадлежность к «Отрицательное»: 0,0;
- принадлежность к «Нулевое»: 0,6;
- принадлежность к «Положительная»: 0,4.

Степень активации правил:

- Правило 1: $w_1 = 0,0 \cdot 0,0 \cdot 0,0 = 0,0$.
- Правило 2: $w_2 = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,6 = 0,6$.
- Правило 3: $w_3 = 0,0 \cdot 0,0 \cdot 0,4 = 0,0$.

6. Вычисление выходов правил

Правило 2:

$$\Delta x_2 = 0,15 \cdot 50 + 0,1 \cdot 10 + 0,03 \cdot 2 = 7,5 + 1,0 + 0,06 = 8,5,$$

$$\Delta y_2 = 0,1 \cdot 50 + 0,15 \cdot 10 + 0,02 \cdot 2 = 5 + 1,5 + 0,04 = 6,54.$$

7. Агрегация выходов

$$\Delta x = \frac{w_1 \Delta x_1 + w_2 \Delta x_2 + w_3 \Delta x_3}{w_1 + w_2 + w_3} = \frac{0,0 + 8,56 + 0,0}{0,0 + 0,6 + 0,0} = 14,2,$$

$$\begin{aligned} \Delta y &= \frac{w_1 \Delta y_1 + w_2 \Delta y_2 + w_3 \Delta y_3}{w_1 + w_2 + w_3} = \\ &= \frac{0,0 + 6,54 + 0,0}{0,0 + 0,6 + 0,0} = 10,9. \end{aligned}$$

8. Обновление координат

Если текущие координаты поезда $x(t) = 100$ м, $y(t) = 200$ м, то:

$$x(t+1) = 114,2 \text{ м.}$$

$$y(t+1) = 210,9 \text{ м.}$$

Таким образом, рассмотренный пример показал, что предлагаемый метод позволяет рассчитать предполагаемое положение транспортного средства.

Заключение

Поддержка принятия решений, основанная на нечеткой логике модели Такаги — Сугено, может быть эффективно использована для определения координат объектов железнодорожного транспорта.

Применение нечеткого вывода на основе модели Такаги — Сугено для железной дороги имеет следующие **достоинства**:

1. *Учет неопределенности и неточности данных*: железнодорожные системы часто работают в условиях неопределенности (например, состояние путей, человеческий фактор и др.). Нечеткая логика позволяет эффективно обрабатывать данные в условиях «информационной слепоты», а также их нечеткости.

2. *Адаптивность*: модель Такаги — Сугено может адаптироваться к изменяющимся условиям, таким как изменение скорости поезда, угла поворота, состояния пути и многое другое.

3. *Простота интерпретации*: нечеткие правила в базе знаний нечеткой модели легко интерпретировать и настраивать, что позволяет сделать систему понятной для оператора, машиниста и инженера.

4. *Эффективность в нелинейных системах*: железнодорожные системы часто имеют нелинейные зависимости (например, зависимость тормозного пути от скорости и состояния пути). Для разрешения таких зависимости модель Такаги — Сугено является мощным инструментом.

5. *Возможность интеграции с другими системами*: нечеткий вывод на основе модели Такаги — Сугено можно интегрировать с системами автоматического управления, мониторинга и прогнозирования.

6. *Снижение аварийности*: с помощью модели Такаги — Сугено можно заблаговременно прогнозировать и подать верный управляющий сигнал в опасных ситуациях (например, повышение скорости на криволинейных участках) для предотвращения критических ситуаций.

7. *Оптимизация движения*: модель Такаги — Сугено может помочь оптимизировать скорость и маршрут железнодорожного транспорта, например, снизив энергопотребление и увеличив пропускную способность на конкретном участке пути.

К **недостаткам** применения модели Такаги — Сугено на железной дороге относятся:

1. *Сложность настройки модели*: для создания эффективной модели требуется обширная база

знаний и точная настройка функций принадлежности, что может быть трудоемким процессом.

2. *Зависимость от качества данных*: если входные данные (например, скорость, угол поворота, состояние пути) зашумлены, это может привести к ошибочным решениям.

3. *Вычислительная сложность*: для высокой точности при большом количестве входных переменных и правил вычислительная сложность модели может увеличиваться, что требует мощных вычислительных ресурсов.

4. *Ограниченная способность к обучению*: в отличие от нейронных сетей, модель Такаги — Сугено не обладает способностью к самообучению. Для ее улучшения требуется ручная корректировка правил и параметров.

5. *Трудности масштабирования*: модель, разработанная для одного участка железной дороги,

может не подходить для других участков без значительной доработки.

6. *Зависимость от экспертных знаний*: для создания правил и функций принадлежности часто требуются экспертные знания, которые может быть трудно получить.

Таким образом, для успешного внедрения системы поддержки принятия решений на основе нечеткого вывода Такаги — Сугено важно и полезно:

- тщательно настроить функции принадлежности и создать обширную базу знаний;
- обеспечить высокое качество входных данных;
- интегрировать систему с другими технологиями (например, IoT для сбора данных).

Анализ работ [12, 13] показал, что актуальное дальнейшее направление исследований и разработок может быть связан с организацией управления беспилотного транспортного средства на железной дороге.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сарайкин А. И., Аралбаев Т. З., Хасанов Р. И. Позиционирование мобильного объекта на дорожном полотне в условиях дефицита информации // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 4 (179). С. 114–118.
2. Хруль С. А., Сонькин Д. М. Повышение точности позиционирования подвижных объектов на основе оригинальных методов фильтрации навигационных данных // Науковедение. 2013. № 4 (17). 11 с.
3. Антонович К. М., Карпик А. П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2004. № 1. С. 53–67.
4. ГЛОНАСС — стратегический ресурс России / А. Ю. Данилюк, С. Г. Ревнивых, Н. А. Тестоедов [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2013. Вып. 6 (52). С. 17–23.
5. Ядровская М. В., Поркшеян М. В., Синельников А. А. Перспективы технологии интернета вещей // Advanced Engineering Research. 2021. Т. 21, № 2. С. 207–217. DOI: 10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217.
6. Gerber A., Romeo J. Connecting All the Things in the Internet of Things // IBM Developer. 2020. 30 January. URL: <http://developer.ibm.com/articles/iot-lp101-connectivity-network-protocols> (дата обращения: 09.02.2025).
7. Provotorov A., Privezentsev D., Astafiev A. Development of Methods for Determining the Locations of Large Industrial Goods During Transportation on the Basis of RFID // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. Pp. 1005–1009. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.163.
8. Методика применения нечетких множеств в системе поддержки принятия решений робототехнического комплекса / С. В. Войцеховский, У. Ю. Головчанская, С. В. Логашев, Ю. С. Фоменко // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2018. № 2 (14). С. 34–40.
9. Хомоненко А. Д., Логашев С. В., Краснов С. А. Автоматическая рубрикация документов с помощью латентно-семантического анализа и алгоритма нечеткого вывода Мамдани // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 1 (44). С. 5–19.
10. Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для оценки качества моделей искусственного интеллекта на основе имеющихся данных / С. Т. Дусакаева, М. П. Носарев, И. А. Хохлов, П. Л. Нирян // Со-

временные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 170–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).170-180.

11. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. SMC-15, Iss. 1. Pp. 116–132. DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399.

12. Филатова Е. С., Девяткин А. В., Фридрих А. И. Система стабилизации БПЛА на основе нечеткой логики // Сборник докладов XX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM) 2017), (Санкт-Петербург, Россия, 24–26 мая 2017 г.). Т. 1. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 380–383.

13. Fakurian F., Menhaj M. B., Mohammadi A. Design of a Fuzzy Controller by Minimum Controlling Inputs for a Quadrotor // Proceedings of the Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM 2014), (Tehran, Iran, 15–17 October 2014). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. Pp. 619–624. DOI: 10.1109/ICRoM.2014.6990971.

Дата поступления: 13.02.2025

Решение о публикации: 14.02.2025

Detection of Transport Object Coordinates Under Signal Scarcity Using Takagi — Sugeno Fuzzy Inference Model

Yulia S. Fomenko¹ — Postgraduate Student of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, fuzzy intelligent systems, artificial intelligence systems. E-mail: yu.srgvn@gmail.com.

Anatoly D. Khomonenko^{1,2} — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Information and Computing Systems Department; Professor of the Mathematical and Software Engineering Department. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modelling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

²Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

For citation: Fomenko Yu. S., Khomonenko A. D. Detection of Transport Object Coordinates Under Signal Scarcity Using Takagi — Sugeno Fuzzy Inference Model. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 46–55. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-46-55. (In Russian)

Abstract. *The significance of real-time detection of transport object coordinates has increased in conditions of information “blindness” when traditional navigation methods become unavailable. This is especially important in rail transport where positioning errors can lead to catastrophic consequences. **Purpose:** to develop an algorithm based on Takagi — Sugeno fuzzy inference to improve the accuracy and reliability of detecting the transport object coordinates in conditions of data scarcity. **Methods:** an adaptive model integrating fuzzy logic for processing incomplete and contradictory signals is proposed. The algorithm implements multi-level data analysis taking into account the dynamics of movement and external interference for the infrastructure critical sections. **Results:** computer experiments have been conducted for railway sections with a limited number of track sensors. Recommendations on the algorithm application to support decision-making have been developed. **Discussion:** the effectiveness of using fuzzy logic to compensate for information “blindness” has been proven. The prospects for implementing the algorithm in security and dispatching systems, as well as the need for further optimization of computational complexity for high-speed objects have been outlined.*

Keywords: identification, object coordinates, transport objects, Takagi — Sugeno algorithm, information “blindness”, traffic safety

REFERENCES

1. Saraikin A. I., Aralbaev T. Z., Khasanov R. I. Pozitsionirovanie mobilnogo obekta na dorozhnom polotne v usloviyakh defitsita informatsii [Positioning of Mobile Objects on the Roadway in a Deficit of Information], *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Vestnik of the Orenburg State University]*, 2015, No. 4 (179), Pp. 114–118. (In Russian)
2. Khrul S. A., Sonkin D. M. Povyshenie tochnosti pozitsionirovaniya podvizhnykh obektov na osnove originalnykh metodov filtratsii navigatsionnykh dannykh [Increasing Positioning Accuracy of Moving Objects Based on the Original Navigation Data Filtering Methods], *Naukovedenie*, 2013, No. 4 (17), 11 p. (In Russian)
3. Antonovich K. M., Karpik A. P. Monitoring obektov s primeneniem GPS-tekhnologiy [Monitoring of Objects Using GPS Technologies], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka [Proceedings of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 2004, No. 1, Pp. 53–67. (In Russian)
4. Danilyuk A. Yu., Revnivykh S. G., Testoedov N. A., et al. GLONASS — strategicheskiy resurs Rossii [GLONASS Is the Strategic Resource of Russia], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva [Vestnik of the Reshetnev Siberian State Aerospace University]*, 2013, Iss. 6 (52), Pp. 17–23. (In Russian)
5. Yadrovskaya M. V., Porsheyev M. V., Sinelnikov A. A. Prospects of IoT Technology, *Advanced Engineering Research*, 2021, Vol. 21, No. 2, Pp. 207–217. DOI: 10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217.
6. Gerber A., Romeo J. Connecting All the Things in the Internet of Things, *IBM Developer*. Published online January 30, 2020. Available at: <http://developer.ibm.com/articles/iot-lp101-connectivity-network-protocols> (accessed: 09.02.2025).
7. Provotorov A., Privezentsev D., Astafiev A. Development of Methods for Determining the Locations of Large Industrial Goods During Transportation on the Basis of RFID, *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 129, Pp. 1005–1009. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.163.
8. Voytsekhovskiy S. V., Golovchanskaya U. Yu., Logashev S. V., Fomenko Yu. S. Metodika primeneniya nechetkikh mnozhestv v sisteme podderzhki prinyatiya resheniy robototekhnicheskogo kompleksa [Method of Application of Fuzzy Sets in the System of Support of Decision-Making of the Robotechnical Complex], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2018, No. 2 (14), Pp. 34–40. (In Russian)
9. Khomonenko A. D., Logashev S. V., Krasnov S. A. Avtomaticheskaya rubrikatsiya dokumentov s pomoshchyu latentno-semanticheskogo analiza i algoritma nechetkogo vyvoda Mamdani [Automatic Categorization of Documents Using Latent Semantic Analysis and Fuzzy Inference Algorithm of Mamdani], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2016, Iss. 1 (44), Pp. 5–19. (In Russian)
10. Dusakaeva S. T., Nosarev M. P., Khokhlov I. A., Niryan P. L. Primenenie algoritma nechetkoy logiki Mamdani dlya otsenki kachestva modeley iskusstvennogo intellekta na osnove imeyushchikhsya dannykh [Application of the Mamdani Fuzzy Logic Algorithm to Assess the Quality of Artificial Intelligence Models Based on Available Data], *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2023, No. 1 (77), Pp. 170–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).170-180. (In Russian)
11. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, Vol. SMC-15, Iss. 1, Pp. 116–132. DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
12. Filatova E. S., Devyatkin A. V., Fridrix A. I. Sistema stabilizatsii BPLA na osnove nechetkoy logiki [UAV Fuzzy Logic Stabilization System], *Sbornik dokladov XX Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam [Proceedings of the XX International Conference on Soft Computing and Measurement] (SCM'2017)*, St. Petersburg, Russia, May 24–26, 2017. Vol. 1. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 2017, Pp. 380–383. (In Russian)
13. Fakurian F., Menhaj M. B., Mohammadi A. Design of a Fuzzy Controller by Minimum Controlling Inputs for a Quadrotor, *Proceedings of the Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM 2014)*, Tehran, Iran, October 15–17, 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. Pp. 619–624. DOI: 10.1109/ICRoM.2014.6990971.

Received: 13.02.2025

Accepted: 14.02.2025