

М. А. АЛЛЕС, С. В. СОКОЛОВ, С. М. КОВАЛЕВ

## ОПТИЧЕСКИЕ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Обсуждается проблема аппаратной реализации нечетко-логических устройств и систем, осуществляющих обработку нечеткой информации. Рассмотрены недостатки существующих микропроцессорных средств обработки. Показаны перспективы применения нечетко-логических устройств, использующих пространственно-распределенные оптические вычисления, рассмотрен пример аппаратной реализации — оптический дефазификатор.

*Ключевые слова:* нечеткая логика, микропроцессор, оптические технологии обработки информации, оптический фазификатор.

**Введение.** В последние десятилетия резко возрос интерес к различным аспектам проблемы интеллектуального управления. Одно из основных направлений, связанных с решением этой проблемы, — использование аппарата нечетких систем: нечетких множеств, нечеткой логики, нечеткого моделирования и т.п. Применение этого аппарата обуславливает возможность построения систем управления и моделирования в ситуациях, когда традиционные методы неэффективны либо вообще неприменимы из-за отсутствия знаний об объекте управления или сложности его математической формализации [1].

Мировая практика применения аппарата нечетких систем показывает удовлетворительные результаты при построении автоматических и автоматизированных систем в различных отраслях промышленности, транспортной инфраструктуры, проектирования: например, таких, как проектирование промышленных роботов и бытовых электроприборов, управление

доменными печатами и движением поездов метро, автоматическое распознавание речи и изображений [1].

Однако для эффективной реализации нечетких алгоритмов управления и моделирования, требующих обработки большого объема информации при малом времени реакции системы управления, необходимо создание специализированных технических средств, ориентированных на обработку нечеткой информации практически в режиме реального времени.

**Синтез оптических нечетко-логических устройств.** В настоящее время основную техническую базу нечетких технологий составляют микропроцессорные средства и микроконтроллеры [2]. Но эти устройства не способны в полной мере реализовать все потенциальные возможности нечеткой логики по следующим объективным причинам:

— их быстроедействие в части реализации ряда сложных нечетких операторов ограничено из-за последовательной обработки данных, присущей современным микропроцессорным средствам;

— погрешность вычислений с течением времени постоянно растет вследствие неизбежных методических ошибок, обусловленных использованием цифровых методов вычисления.

Так, например, специализированный вычислительный комплекс обработки нечеткой информации, выполненный на базе микропроцессорных средств [2], позволяет осуществить операцию выборки элемента терма лишь за 5 мкс, а реализацию одной микрокоманды — только за 2 мкс.

Поэтому возникает задача конструирования нового класса устройств обработки нечетко-логической информации, обладающих значительным быстроедействием, простотой конструкции и настройки параметров и обеспечивающих высокую точность вычислений на произвольном интервале времени обработки информации.

Анализ современных информационных технологий показывает, что простота реализации элементарных действий над нечеткими множествами, на которых базируются этапы нечетко-логического вывода [1], а именно:

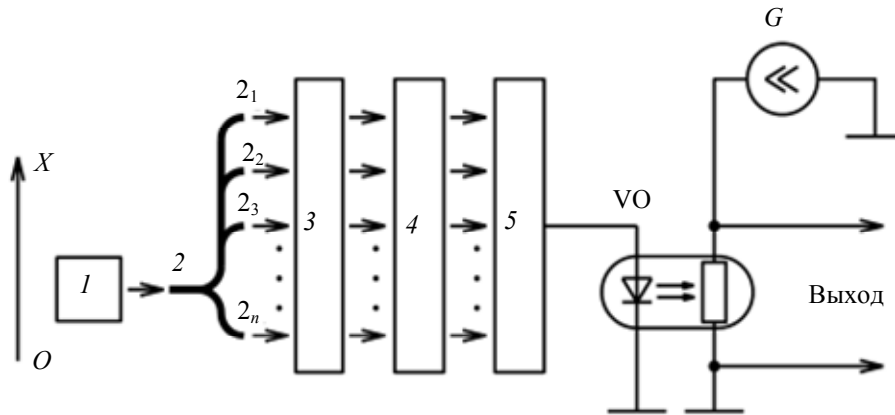
- этап введения нечеткости — фаззификация;
- этап логических операций (операции пересечения, объединения, дополнения нечетких множеств);
- этап приведения к четкости — дефаззификация,

может быть обеспечена путем использования оптоэлектронной технологии обработки информации и основных методов оптической схмотехники [3, 4]. Причем подобная технология позволяет выполнять вышеперечисленные операции в режиме реального времени, т.е. практически мгновенно. При этом отсутствуют необходимость в дискретизации и последовательной обработке всех параметров, характеризующих нечеткие множества, и накопление ошибок вычислений с течением времени (что неизбежно при использовании микропроцессорных схем и регистровых структур [2]).

Так, например, в работе [3, рис. 3, 4] был описан оптоэлектронный фаззификатор, состоящий из источника света, оптического канала передачи, электрооптического дефлектора, маски с отверстиями и блока фотоприемников. Принцип действия такого фаззификатора заключается в том, что значение функции принадлежности конкретного терма лингвистической переменной на базовой шкале определяется как площадь засветки отверстия маски, отнесенная к максимальной площади засветки блока фотоприемников. Однако предложенный в работе [3] оптоэлектронный фаззификатор имеет недостаток — невозможность реализации произвольных функций принадлежности.

В этой связи требуется подобрать такой комплекс методов и средств оптической обработки информации, который позволит наиболее эффективно, гибко и просто реализовывать элементарные действия над нечеткими множествами.

**Оптический фаззификатор.** Для иллюстрации эффективности применения оптических технологий при синтезе нечетко-логических устройств автоматизации рассмотрим конструкцию и принцип действия оптического фаззификатора, функциональная схема которого показана на рисунке.



Оптический фаззификатор — устройство, предназначенное для вычисления в режиме реального времени значения функции

$$\gamma = \max_i \{ \alpha(x_i) \beta(x_i) \}, \quad \alpha(x_i) \in [0, 1], \quad \beta(x_i) \in [0, 1], \quad (1)$$

где  $x_i$  — конкретное числовое („четкое“) значение входной лингвистической переменной, определенное на базовой шкале  $X$  ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ , где  $n$  — определенное число значений базовой шкалы  $X$ ,  $x_i \in X$ );  $\alpha(x_i)$  — функция принадлежности, описывающая терм нечеткой лингвистической переменной  $x$ ;  $\beta(x_i)$  — функция принадлежности нечеткого множества, в виде которого представлена входная переменная  $x$ .

Функционирование оптического фаззификатора осуществляется следующим образом. С выхода источника излучения  $I$  оптический поток с интенсивностью  $n$  усл. ед. поступает на вход оптического  $n$ -выходного разветвителя  $2$ , с выходов  $2_1, 2_2, \dots, 2_n$  которого оптические потоки единичной интенсивности поступают на входы первого линейного оптического транспаранта (ЛОТ)  $3$  с функцией пропускания по оси  $OX$ , пропорциональной  $(\sqrt{\alpha(x)})^{-1}$ . На выходах ЛОТ  $3$  формируется плоский оптический поток с интенсивностью по оси  $OX$ , пропорциональной функции  $1/\alpha(x)$ . Этот оптический поток поступает на входы второго ЛОТ  $4$  с функцией пропускания по оси  $OX$ , пропорциональной  $(\sqrt{\beta(x)})^{-1}$ , на выходах которого формируется оптический поток с интенсивностью по оси  $OX$ , пропорциональной функции  $1/(\alpha(x)\beta(x))$ . Данный оптический поток поступает на соответствующие входы селектора минимального сигнала (СМС)  $5$  (аналогичного описанному в работе [5]), с выхода которого снимается сигнал напряжения, пропорциональный значению  $U = \min_k \{ 1/(\alpha(x_k)\beta(x_k)) \}$ ,  $k = 1, \dots, n$  (при этом очевидно, что минимум значения функции  $1/(\alpha(x)\beta(x))$  определен для того же значения аргумента  $x_i$ , для которого определен и максимум функции  $\alpha(x_i)\beta(x_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ ).

Выходной сигнал СМС  $5$  поступает на светоизлучающий диод резисторной оптопары  $VO$ . Сопротивление  $R_{VO}$  обратно пропорционально входному току резисторной оптопары [6], т.е. выходному сигналу СМС  $5$ , и, следовательно,

$$R_{VO} \sim \frac{1}{1/(\alpha(x_i)\beta(x_i))} \sim \alpha(x_i)\beta(x_i). \quad (2)$$

Напряжение на выходе резисторной оптопары определяется как

$$U_{\text{Вых}} = R_{VO} \cdot I, \quad (3)$$

где  $I = 1$  усл. ед. — ток генератора  $G$  стабильного тока (выполненного аналогично генератору, описанному в работе [7, с. 190, рис. 9.4 б]).

Таким образом, с учетом выражений (2) и (3), напряжение  $U_{\text{вых}}$  оказывается пропорциональным величине  $\alpha(x_i)\beta(x_i)$ , т.е. пропорциональным искомому значению  $\gamma$ :  $\gamma \sim U_{\text{вых}}$ .

Неизбежность многофазной обработки оптических потоков в рассмотренном фаззификаторе обусловлена необходимостью последовательного выполнения принципиально различных математических операций в процессе фаззификации (1), приводящих, в свою очередь, к использованию различных методов оптической обработки информации. В целом быстродействие оптического фаззификатора определяется динамическими характеристиками селектора минимального сигнала и резисторной оптопары и не превышает десятых долей миллисекунды (время срабатывания СМС, выполненного на лавинных фотодиодах, до 80—100 пс, а резисторной оптопары — до 200 мкс).

**Заключение.** Использование оптических методов обработки информации в нечетко-логических системах позволяет наряду с существенным выигрышем в быстродействии упростить конструкцию и процесс функционирования систем обработки информации. Это достигается благодаря более простой и быстродействующей реализации элементарных операций над нечеткими множествами по сравнению с регистровыми реализациями [2]: в микропроцессорных системах обработки нечеткой информации с увеличением значений базовых шкал нечетких переменных происходит *нелинейное* увеличение времени выполнения этапов фаззификации и дефаззификации [8]. При использовании же оптических устройств обработки нечеткой информации, подобных описанным выше, быстродействие системы практически не зависит от количества элементов нечетких множеств, так как все логические операции над значениями базовых шкал и функций принадлежности нечетких переменных выполняются параллельно и в режиме реального времени. Кроме того, существующие микропроцессорные системы обработки нечеткой информации обладают значительными габаритами, массой и потребляемой мощностью. Так, мультимикропроцессорная система, описанная в работе [8], имеет габаритные размеры 600×2200×1000 мм, массу порядка 170 кг и мощность потребления 4,5 кВт.

В то же время все линейные размеры компонентов рассмотренного оптического фаззификатора имеют микронный порядок, поэтому он достаточно легко может быть реализован в виде оптической интегральной микросхемы с площадью не более 5—10 см<sup>2</sup>. При этом потребляемая мощность активных компонентов оптических интегральных микросхем (полупроводниковых лазеров, оптопар и пр.), как правило, не превышает 1 Вт [9, 10].

В завершение проведенного сравнительного анализа следует отметить, что стоимость нечетко-логических устройств и стабильность их характеристик при оптоинтегральном исполнении в настоящее время не уступает стоимости и стабильности аналогичных устройств, выполненных по традиционной кремниевой технологии [10, 11].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ, 2009. 798 с.
2. Мелихов А. Н., Баронец В. Д. Проектирование микропроцессорных средств обработки нечеткой информации. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1990. 128 с.
3. Городецкий А. Е., Ерофеев А. А., Жуikov А. Ю. Нечеткие технологии управления в оптоэлектронных системах // Тез. докл. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб, 2000.
4. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. М.: Высш. школа, 1988.
5. А.с. 1223259 СССР. Селектор минимального сигнала / С. В. Соколов и др. 1986.

6. Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник / Под ред. Н. Н. Горюнова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 184 с.
7. Либерман Ф. Я. Электроника на железнодорожном транспорте: Учеб. пособие. М.: Транспорт, 1987. 288 с.
8. Масштабируемые мультипроцессорные вычислительные системы высокой производительности / А. Буравлев, М. Чельдиев, А. Барыбин, и др. // Современные технологии автоматизации. 2009. № 3. С. 72—76.
9. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.
10. Клэр Ж.-Ж. Введение в интегральную оптику / Пер. с франц.; Под ред. В. К. Соколова. М.: Сов. радио, 1980. 104 с.
11. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. М.: Радио и связь, 1989. 360 с.

**Сведения об авторах**

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <b>Михаил Александрович Аллес</b> | — аспирант; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: alles@nextmail.ru                    |
| <b>Сергей Викторович Соколов</b>  | — д-р техн. наук, профессор; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: s.v.s.888@yandex.ru |
| <b>Сергей Михайлович Ковалев</b>  | — д-р техн. наук, профессор; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: ksm@rfniias.ru      |

Рекомендована кафедрой  
автоматики и телемеханики на  
железнодорожном транспорте

Поступила в редакцию  
22.03.11 г.