

УДК 004.3

© М. А. Аллес, С. В. Соколов, С. М. Ковалев

СИНТЕЗ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Статья посвящена одной из актуальных проблем в области создания нечетко-логиче­ских систем — аппаратной реализации систем, реализующих обработку нечеткой информации. Рассмотрены недостатки существующих микропроцессорных средств обработки нечеткой информации и в качестве альтернативы — основные принципы использования оптических методов обработки информации в нечетко-логиче­ских системах (на примере оптических фаззификатора и дефаззификатора). Показаны основные преимущества применения оптических устройств обработки нечеткой информации.

Кл. сл.: нечеткая логика, микропроцессор, оптические методы обработки информации, оптический фаззификатор, оптический дефаззификатор

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение нечеткой логики для моделирования и управления сложными системами является одним из наиболее перспективных направлений прикладных исследований в области управления и принятия решений. Применение нечеткой логики оказывается особенно полезным, когда в описании технических систем присутствует неопределенность, которая затрудняет или даже исключает применение точных количественных методов и подходов, — зачастую ее использование позволяет получать более адекватные результаты по сравнению с результатами, которые основываются на использовании традиционных аналитических моделей и алгоритмов управления [1].

Но при этом для эффективной реализации нечетких алгоритмов управления, требующих обработки большого объема информации при малом времени реакции системы управления, возникает задача создания специализированных технических средств, ориентированных на обработку нечеткой информации практически в реальном времени.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На сегодняшний день техническую базу нечетких технологий составляют микропроцессорные средства и микроконтроллеры, основанные на цифровых вычислениях [2]. Но микропроцессоры и однокристальные микроконтроллеры не способны в полной мере реализовать все потенциальные возможности нечеткой логики по следующим основным причинам:

– их быстродействие ограничено в части реализации ряда сложных нечетких операторов из-за

последовательной обработки данных, присущей современным микропроцессорным средствам;

– погрешность вычислений с течением времени постоянно растет из-за 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 быстродействием, простотой конструкции, простотой настройки параметров и обеспечивающих высокую точность вычисления на произвольном интервале времени обработки информации.

Анализ современных информационных технологий показывает, что простоту 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

— позволяет получить использование оптоэлектронной технологии и основных методов оптической схемотехники [3].

Причем подобная технология позволяет выполнять вышеперечисленные операции в режиме реального времени, т. е. практически мгновенно.

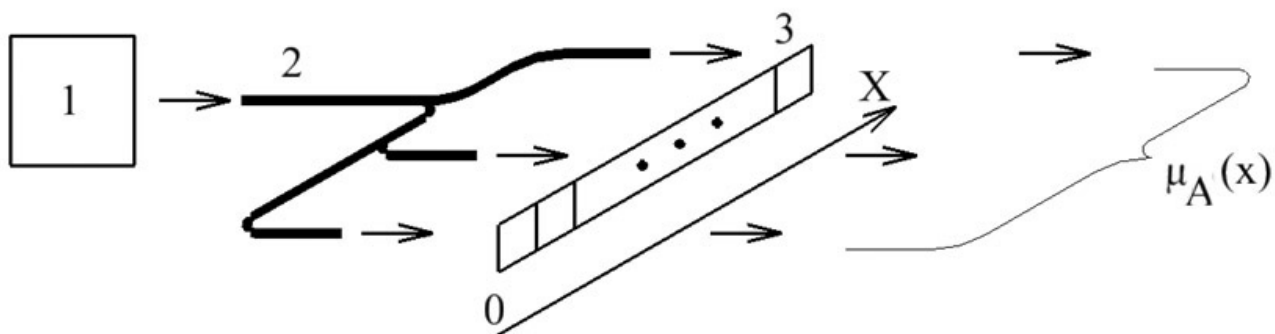


Рис. 1. Пространственно-распределенное представление функции принадлежности нечеткого множества. 1 — источник света, 2 — оптический разветвитель, 3 — линейный оптический транспарант

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]).

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ СИНТЕЗЕ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При использовании оптических методов обработки нечеткой информации одним из основных является принцип пространственно-распределенного представления функции принадлежности нечеткого множества (рис. 1).

Функция принадлежности $\mu_A(x)$ нечеткого множества A представляется в данном случае амплитудой плоского пространственно-распределенного оптического потока, формируемого на выходах линейного оптического транспаранта 3 (рис. 1), функция пропускания которого вдоль оси Ox пропорциональна $\mu_A(x)$.

Для этого оптический поток с выхода источника излучения 1 поступает на вход оптического разветвителя 2 и далее — на входы линейного оптического транспаранта (ЛОТ) 3. На выходах последнего формируется в реальном масштабе времени плоский пространственно-распределенный оптический поток с амплитудой по оси Ox , пропорциональной $\mu_A(x)$.

Применение остальных принципов применения оптической технологии при синтезе нечетко-логических систем обработки информации и их эффективность рассмотрим на примерах конкретных устройств, реализующих основные этапы нечетко-логического вывода.

ОПТИЧЕСКИЙ ФАЗЗИФИКАТОР

Оптический фаззификатор, предназначенный для выполнения операции "введения нечеткости" в случае, если входная переменная представлена в виде нечеткого множества, показан на рис. 2.

Операция фаззификации с использованием нечеткого значения входной переменной \tilde{x} выполняется в соответствии с выражением [4]

$$\mu_A(x) = \left\{ \max_x (\mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_x(\tilde{x})) \right\}, \quad (1),$$

где $\mu_A(x)$ — искомое значение функции принадлежности для переменной x для нечеткого множества A ; $\mu_A(\tilde{x})$ — функция принадлежности, описывающая нечеткое множество A ; $\mu_x(\tilde{x})$ — функция принадлежности, описывающая нечеткое множество входной переменной x .

Оптический фаззификатор (рис. 2) содержит источник когерентного излучения (ИКИ), два ЛОТ (ЛОТ1 и ЛОТ2), оптический фазовый модулятор (ОФМ), оптические Y-объединители, селектор минимального сигнала (СМС), блок извлечения квадратного корня (БИК), блок вычитания (БВ) и оптические волноводы, и разветвители.

Далее необходимо иметь в виду, что функция пропускания ЛОТ1 распределена вдоль оси Ox и пропорциональна функции принадлежности $\mu_A(\tilde{x})$, а функция пропускания ЛОТ2 также распределена вдоль оси Ox , но пропорциональна функции принадлежности $\mu_x(\tilde{x})$.

Принцип действия оптического фаззификатора заключается в следующем. Часть оптического потока с выхода ИКИ, разветвляясь и превращаясь в плоский пространственно-распределенный оптический поток, попадает на входы сначала ЛОТ1, а затем — ЛОТ2. Таким образом, на входах оптических Y-объединителей формируется

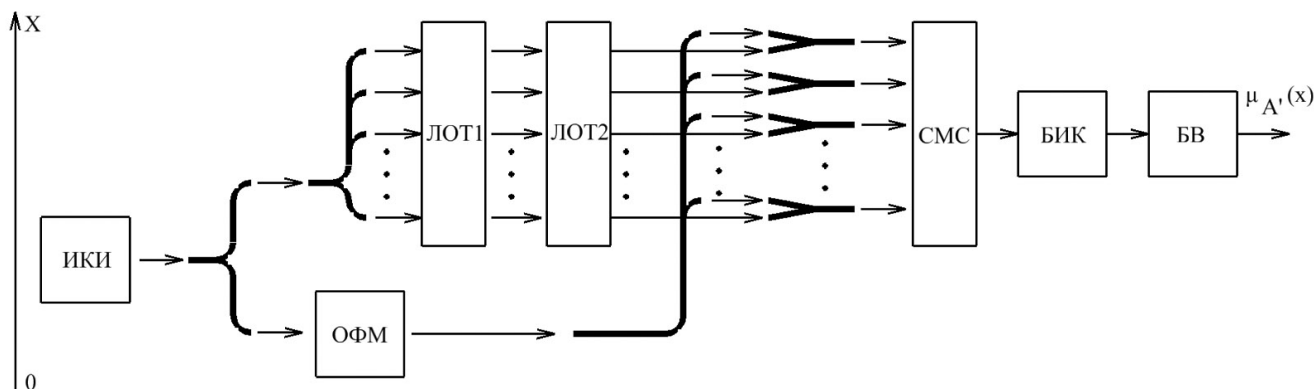


Рис. 2. Оптический фаззификатор.

ИКИ — источник когерентного излучения; ОФМ — оптический фазовый модулятор; ЛОТ1, ЛОТ2 — линейные оптические транспортеры; СМС — селектор минимального сигнала; БИК — блок извлечения квадратного корня; БВ — блок вычитания

пространственно-распределенный оптический поток с распределением амплитуды вдоль оси OX , равной $(\mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_X(\tilde{x}))$. Одновременно другая часть оптического потока с выхода ИКИ попадает на вход ОФМ, сдвигающего фазу поступающего оптического потока на π . Такой инвертированный поток, пройдя через разветвитель, поступает на другие входы оптических Y -объединителей.

Так как на одни входы оптических Y -объединителей с выходов ЛОТ2 поступают оптические потоки с амплитудами, пропорциональными произведению $(\mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_X(\tilde{x}))$, а на другие входы — оптические потоки с единичной интенсивностью, но инвертированной фазой, то оптические потоки с выходов оптических Y -объединителей интерферируя формируют на соответствующих входах СМС [5] оптические потоки с интенсивностями, пропорциональными $(1 - \mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_X(\tilde{x}))^2$. В СМС, представляющем собой по существу линейку фотодиодов и подробно описанном в [5], происходит выбор минимального сигнала из всей входной сигнальной совокупности (причем практически в реальном времени — за время, определяемое временем срабатывания фотодиода). То есть с выхода СМС снимается сигнал напряжения, пропорциональный величине

$$U = \left\{ \min_x (1 - \mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_X(\tilde{x}))^2 \right\}. \quad (2)$$

При этом для последующего понимания принципа работы устройства следует иметь в виду, что в силу неравенства $\mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_X(\tilde{x}) \leq 1$ (по определению $\mu_A(\tilde{x})$, $\mu_X(\tilde{x})$) функция $(1 - \mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_X(\tilde{x}))$ принимает минимальное значение на том же зна-

чении аргумента x , при котором функция $(\mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_X(\tilde{x}))$ принимает максимальное значение.

Далее выходной сигнал СМС поступает на вход БИК, который может быть легко реализован в виде стандартного блока (например, описанного в [6]).

С выхода БИК сигнал, пропорциональный минимальному значению $(1 - \mu_A(\tilde{x}) \cdot \mu_X(\tilde{x}))$, поступает на вход БВ, который может быть также легко реализован в виде стандартного блока (например, описанного в [7]). В БВ поступивший сигнал вычитается из единицы.

Таким образом, на выходе БВ — на выходе устройства, формируется искомое значение функции (1).

ОПТИЧЕСКИЙ ДЕФАЗЗИФИКАТОР

Для выполнения операции дефаззификации — заключительной в процедуре нечетко-логического вывода, может быть использован оптический дефаззификатор (ОДФ) (рис. 3), выполняющий вычисление четкого значения (номера) лингвистической переменной y по методу медианы. Значение выходной переменной y_{out} при этом определяется из интегрального уравнения

$$y_{out} : \int_{y_1}^{y_{out}} \mu(y_\Sigma) dy = \int_{y_{out}}^{y_2} \mu(y_\Sigma) dy, \quad (3)$$

где y_{out} — искомое четкое значение выходной лингвистической переменной (точка, в которой площадь поверхности, ограниченной осью Y и функцией $\mu(y_\Sigma)$, делится пополам, $y_{out} \in [y_1, y_2]$); y_1 , y_2 — соответственно наименьшее и наибольшее

значения аргумента функции $\mu(y_\Sigma)$ из области ее определения; $\mu(y_\Sigma)$ — результирующая после процедуры агрегирования функция принадлежности выходной лингвистической переменной y .

ОДФ (рис. 3) содержит источник плоского когерентного излучения (ИКИ); ЛОТ (функция пропускания ЛОТ распределена вдоль оси OY и равна функции принадлежности $\mu(y_\Sigma)$); оптические Y -разветвители; два оптических интегратора (ОИ1 и ОИ2); оптический транспарант (ОТ) с функцией пропускания, равной 0.5; оптический фазовый модулятор (ОФМ); оптические Y -объединители; фотоприемники (ФП); нуль-индикаторы (НИ); шифратор (Ш); оптические волноводы и разветвитель.

Принцип действия данного устройства заключается в следующем. С выхода ИКИ плоский пространственно-распределенный оптический поток, состоящий из совокупности оптических потоков с амплитудами 2 усл. ед. каждый, попадает на входы оптических Y -разветвителей через ЛОТ, формируя на их входах плоский пространственно-распределенный по оси OY оптический поток с амплитудой, равной $2 \times \mu(y_\Sigma)$. С выходов оптических Y -разветвителей первая часть оптического потока поступает на входы ОИ1, выполняющего функцию определенного интегрирования (и легко реализуемого в виде фокусирующей линзы), а вторая часть — на входы ОИ2, выполняющего функцию неопределенного интегрирования (и легко

реализуемого в виде обычного фурье-интегратора, описанного в [3]). На выходе ОИ1 формируется точечный оптический поток с амплитудой

$$n \cdot \int_{y_1}^{y_2} \mu(y_\Sigma) dy$$

(где n — количество значений лингвистической переменной y), поступающий на вход ОТ (с функцией пропускания, равной 0.5).

Следовательно, на вход ОФМ поступает точечный оптический поток с амплитудой, равной

$$\frac{1}{2} \cdot n \cdot \int_{y_1}^{y_2} \mu(y_\Sigma) dy$$

поступившего потока, который затем разветвляясь превращается в плоский пространственно-распределенный оптический поток, состоящий из

оптических потоков с амплитудой $\frac{1}{2} \cdot \int_{y_1}^{y_2} \mu(y_\Sigma) dy$

каждый. Совокупность таких оптических потоков с инвертированными фазами поступает далее на первые входы оптических Y -объединителей.

Одновременно на выходе ОИ2 формируется плоский оптический поток с амплитудой по оси

OY , равной $\int \mu(y_\Sigma) dy$, поступающий на вторые

входы оптических Y -объединителей.

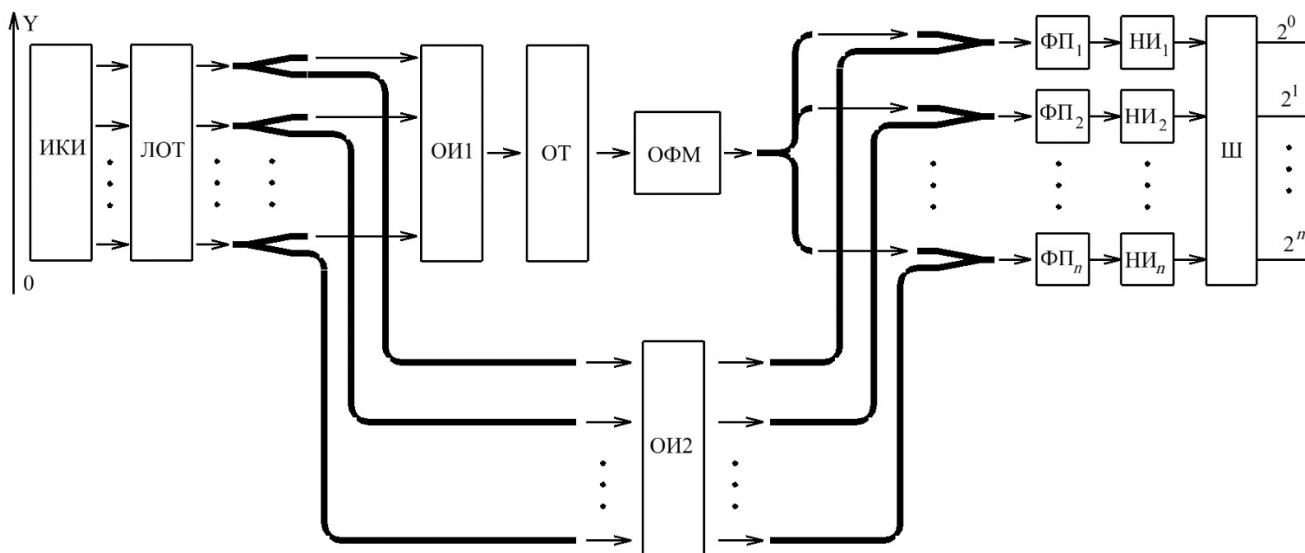


Рис. 3. Оптический дефазификатор.

ИКИ — источник плоского когерентного излучения; ЛОТ — линейный оптический транспарант; ОИ1, ОИ2 — оптические интеграторы; ОТ — оптический транспарант; ОФМ — оптический фазовый модулятор; ФП₁, ..., ФП_n — фотоприемники; НИ₁, ..., НИ_n — нуль-индикаторы; Ш — шифратор

Следовательно, на первые входы оптических У-объединителей поступают сдвинутые по фазе на π оптические потоки с амплитудами, пропорциональными

определенному интегралу $\frac{1}{2} \int_{y_1}^{y_2} \mu(y_\Sigma) dy$,

а на вторые входы — оптические потоки с амплитудами, пропорциональными по оси ОУ интегралу

$\int \mu(y_\Sigma) dy$ (для каждого конкретного значения y_i из

области определения функции $\mu(y_\Sigma)$ —

$\int_{y_1}^{y_i} \mu(y_\Sigma) dy$, $i = 1, 2, \dots, n$. Интерферируя, данные све-

товые потоки формируют на входе соответствующих ФП₁, ФП₂, ..., ФП_n поток оптического излучения с интенсивностью

$$\left(\int_{y_1}^{y_i} \mu(y_\Sigma) dy - \frac{1}{2} \int_{y_1}^{y_2} \mu(y_\Sigma) dy \right)^2.$$

Наименьший по интенсивности (равный нулю) поток формируется на входе того фотоприемника ФП_k, где выполнено условие, описываемое формулой (3). Сигналы с выходов ФП₁, ФП₂, ..., ФП_n поступают на входы соответствующих НИ₁, НИ₂, ..., НИ_n (реализуемых, например, в виде компараторов, работающих в режиме нуль-индикации [7]). Тот НИ, на входе которого будет нулевой сигнал, формирует на своем выходе сигнал логической 1. Этот сигнал поступает на соответствующий вход Ш, который на своих выходах 0, 1, ..., m формирует двоичное число, соответствующее значению (номеру) четкого значения на базовой шкале выходной переменной y из условия, описываемого формулой (3).

ВЫВОДЫ

Применение оптических методов обработки информации в нечетко-логических системах позволяет как получить существенный выигрыш в быстродействии, так и упростить конструкцию и процесс функционирования систем обработки информации благодаря более простой и быстродействующей реализации элементарных операций над нечеткими множествами по сравнению с регистровыми реализациями, описанными в [2]. Так, в микропроцессорных системах обработки нечеткой информации [2] с увеличением значений базовых шкал нечетких переменных (элементов нечетких множеств) происходит нелинейное увеличение

времени выполнения этапов фаззификации и дефаззификации (а также логических операций), т. к. приходится обрабатывать последовательно большое число данных. (Самая современная мультипроцессорная система [9], обладающая теоретической пиковой вычислительной производительностью 447 GFLOPS, имеет задержку пакетов данных по ведущей вычислительной сети до 3–4 мкс). При использовании же оптических устройств обработки нечеткой информации, подобных описанным выше, быстродействие системы определяется в основном применяемыми в ее составе оптоэлектронными приборами и практически не зависит от количества элементов нечетких множеств, т. к. все логические операции над значениями базовых шкал и функций принадлежности нечетких переменных выполняются параллельно и в реальном времени. Так как в настоящее время диапазон быстродействия существующих оптоэлектронных приборов составляет 10^{-12} – 10^{-9} с, то это обеспечивает возможность применения предложенных устройств и принципов их построения в системах обработки большого объема информации, функционирующих практически в режиме реального времени.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-07-00158.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2003. 736 с.
2. Мелихов А.Н., Баронец В.Д. Проектирование микропроцессорных средств обработки нечеткой информации. Ростов-н/Д.: Изд-во Ростовского университета, 1990. 128 с.
3. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. М.: Высшая школа, 1988. 237 с.
4. Борисов В.В., Круглов В.В., Федюлов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 284 с.
5. Соколов С.В. и др. Селектор минимального сигнала А.с. № 1223259, СССР, 1986.
6. Бобровников Л.З. Электроника. Учебник для вузов. 5-е изд. СПб.: Изд-во Питер, 2004. 560 с.
7. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Пер. с франц. Л.: Изд-во Энергия, 1974. 216 с.
8. Щерба А. Программируемые аналоговые ИС Anadigm: применение конфигурируемых аналоговых модулей в составе программы Anadigm-Designer 2 // Компоненты и технологии. 2007. № 12.
9. Буравлёв А., Чельдиев М., Барыбин А. и др. Масштабируемые мультипроцессорные вычислительные системы высокой производительности // Современные технологии автоматизации. 2009. № 3. С. 72–77.

*Ростовский государственный университет путей
сообщения, г. Ростов-на-Дону*

Контакты: *Аллес Михаил Александрович,*
alles@nextmail.ru

Материал поступил в редакцию 30.08.2010.

FUZZY-LOGIC PROCESSING INFORMATION SYSTEMS ON THE BASIS OF OPTIC INFORMATION TECHNOLOGY

M. A. Alles, S. V. Sokolov, S. M. Kovalev

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

Article is devoted to one of the actual problems in the field of creation of fuzzy-logic systems — hardware realization of devices which processing fuzzy information. Disadvantages of the present microprocessor devices fulfilling processing of the fuzzy information are considered. The attention is paid to the alternate method of hardware realization of processing fuzzy information devices on the basis of optic information technologies (for examples, the optic fuzzification device and optoelectronic defuzzification device are devoted). The main advantages of optic processing fuzzy logic information devices use are discussed.

Keywords: fuzzy logic, microprocessor, optic processing information methods, optic fuzzification device, optic defuzzification device