

В. В. ДЕМЁХИН, д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

Украина, Донецкий национальный университет
E-mail: kaf_radiofiziki@mail.ru

Дата поступления в редакцию
07.03 2007 г.—06.02 2008 г.

Оппонент д. т. н. С. Г. АНТОЩУК
(ОНПУ, г. Одесса)

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РЕШЕНИИ ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Описан новый метод реализации параллельных логических вентилях. Реализация параллельной логики для двухградационных картин рассмотрена на основе топологической обработки информации.

Производительность современных систем искусственного интеллекта, решающих задачи логической обработки информации, управления, распознавания образов и др., пока еще значительно уступает производительности человеческого мозга. Так, например, знакомое лицо в незнакомом окружении мозг распознает за 100—200 мс. Для решения аналогичных задач компьютеру требуется несколько дней [1]. Несмотря на то, что скорость реакции нейронов (10^{-3} с) на 5—6 порядков меньше скорости реакции кремниевых логических элементов (10^{-9} с), мозг быстрее и лучше справляется с подобными задачами. Энергетические затраты мозга на выполнение одной операции в секунду составляют около 10^{-16} Дж, а затраты самого экономного компьютера сегодня не опускаются ниже 10^{-6} Дж.

Производительность и потребляемая мощность системы искусственного интеллекта в значительной степени зависят от используемой элементной базы. Наиболее радикальные позитивные изменения элементной базы могут быть достигнуты применением новых средств и методов обработки информации.

Для решения задач распознавания образов в [2] предложен метод топологической обработки информации (ТОИ). Его сущность заключается в автоматическом изменении топологии стохастических связей между элементами распознающей системы (РС), при котором все предъявляемые на вход РС цифровые изображения оказываются правильно разделенными на два класса. Обучение РС в [2] осуществлялось с помощью ЭВМ.

Экстраполяция метода ТОИ на процессы выполнения логических операций позволит заменить ЭВМ оптическими цифровыми устройствами, выполненными на элементной базе, аналогичной распознающим ТОИ-системам [2]. Все многообразие функций ЭВМ может быть выполнено частью элементов и узлов РС [2] без существенных изменений ее общей структуры.

Целью данной статьи является описание особенностей построения оптических систем логических

вентилей (ЛВ) на основе метода ТОИ и оценка их параметров.

При распознавании образов и реализации логических функций для метода ТОИ характерно:

- расщепление входных сигналов по n оптическим каналам (ОК);
- установление определенной топологии связей между оптическими элементами, т. е. образование распределения ОК по адресам двумерной или одномерной матрицы, исполняющей роль пространственного фильтра;
- изменение топологии связей между оптическими элементами посредством блокирования и/или добавления ОК под управлением входных сигналов;
- определение результата обработки информации по количеству оптических сигналов, поступающих на выход логического или распознающего устройства, не зависящего от их амплитуды, фазы, поляризации и т. д.

Число связей, вид распределения ОК по адресам матрицы и характер изменения топологии связей зависит от условия решаемой задачи.

Метод ТОИ справедлив и для гальванических связей с заменой оптических дискретных сигналов на электрические. Учитывая, что в основе одного из вариантов параллельного выполнения логических операций лежит рассматриваемый ниже эффект “многоцветной” памяти [3, 4], дальнейшее изложение относится к оптическому варианту ТОИ.

Процессы реализации логических функций методом ТОИ можно рассматривать как частный случай процесса распознавания образов интеллектуальными ТОИ-системами. Единство элементной базы и процессов обработки информации дает право считать, что ТОИ-системы искусственного интеллекта способны не только классифицировать изображения, но и решать различные арифметические и логические задачи. Однако применение ТОИ к ЛВ имеет ряд специфических особенностей. Как и в случае распознавания изображений методом ТОИ, на вход ЛВ поступает информация в виде дискретных оптических сигналов. Количество «изображений», предъявляемых в любом порядке, уменьшается до четырех: 00, 01, 10 и 11. Число классов на выходе ЛВ также равно двум (кроме случаев логических функций 0 и 1), а количество независимых РС увеличивается до 16 (табл. 1).

Логические функции двух переменных

Вход		Выход															
A	B	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₁₅
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
ПЛ	0	A·B	A·B̄	A	Ā·B	B	A⊕B	A+B	A+B̄	Ā⊕B̄	B̄	A+B̄	Ā	Ā+B	Ā·B̄	1	

Здесь: ПЛ — положительная логика; · — логическое произведение (И); + — логическая сумма (ИЛИ); ⊕ — операция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ; ̄ — логическое отрицание (НЕ).

Наличие всего четырех «изображений» на входе позволяет заменить стохастические связи детерминированными и значительно сократить их количество. Топология связей, ее изменение и количество связей зависят от вида реализуемой логической функции. При этом необходимость в пороговом элементе, обладающем двумя устойчивыми состояниями, (в [2] его роль исполняет матрица ассоциативных элементов) есть не для всех ЛВ. Число ЛВ, не использующих нелинейные элементы, равно шести, и они реализуют логические функции F₀, F₁, F₃, F₅, F₇, F₁₅. Быстродействие этих ЛВ будет максимальным, а количество элементов — минимальным, поскольку в их состав входят лишь два входных лазерных диода, мультипликатор, ОК и выходной логический вентиль И.

Мультипликатор предназначен для расщепления лазерного пучка на необходимое число пучков. Он может быть выполнен на основе матрицы голограмм [5], специальных интегрально-оптических разветвителей [6] или других оптических систем. ОК может быть реализован как через открытое пространство, так и на основе оптического волокна. Логический элемент И на выходе всех ЛВ на основе ТОИ имеет k=2—3 пространственно разделенных входа и дает на выходе 1, если на все k входов поступает одновременно k или больше оптических сигналов, и 0, если оптический сигнал не поступает хотя бы на один из его входов.

Время совершения одной логической операции

$$t = t_{\text{лд}} + t_{\text{р}} + t_{\text{фп}} \quad (1)$$

где t_{лд} — время излучения лазерного диода;

t_р — время распространения сигнала по ОК;

t_{фп} — время срабатывания фотоприемника логического вентиля И.

Для остальных десяти ЛВ к времени t необходимо добавить еще t_п — время переключения светоклапанной ячейки из непропускного состояния в пропускное или наоборот. Наибольшая задержка сигнала происходит именно на этом переключательном элементе. Так, время переключения жидкокристаллического управляемого транспаранта около 20 мкс [6]. Созданный на основе интерферометра Фабри-Перо трансфазор [6] может переключаться за время, измеряемое долями пикосекунды. Однако на пути промышленной реализации трансфазора и вычислительных устройств на его основе имеется ряд трудностей, отмеченных в [5].

Применение метода ТОИ возможно как в схемах в интегральном исполнении, так и в оптоэлектронных системах, использующих двухмерные входной и выходной каналы. Параллельный доступ к логическим элементам оптоэлектронной схемы позволяет поднять функциональную производительность этой схемы. Общее число индивидуально управляемых полупроводниковых лазерных диодов и фотоприемных элементов соответствующих матриц соизмеримо с числом ЛВ (10⁶...10⁸) [6]. Оптические схемы ЛВ на основе ТОИ по конструктивным особенностям можно разделить на две равные группы. К первой относятся ЛВ, которые дают на выходе 0, при входе 00 (см. функции F₀—F₇). Типичным представителем этой группы является оптическая схема ЛВ, реализующая логическую функцию F₅=B (рис. 1, а).

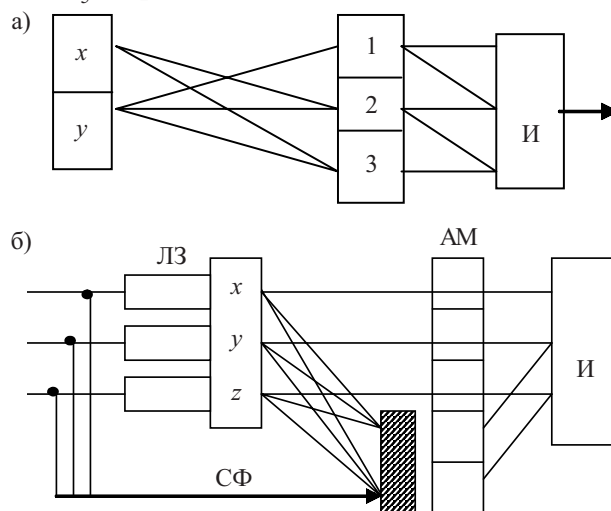


Рис. 1. Структурные схемы однослойных логических устройств ТОИ:

x, y, z — входные ячейки; СФ — система фильтрации сигналов; ЛЗ — линия задержки; АМ — матрица ассоциативных элементов; И — логический вентиль

Для реализации логических функций достаточно образовать оптические связи с двумя-четырьмя ячейками пространственного фильтра (за исключением F₉), часть которых будет всегда открыта.

Логические устройства функций F₀=0, F₁=A·B, F₃=A, F₅=B, F₇=A+B, и F₁₅=1 также не имеют пороговых нелинейных элементов, принадлежащих к системе фильтрации (СФ) (рис. 1, б) и осуществля-

Таблица 2

$F_0 = 0$		$F_1 = A \cdot B$		$F_2 = A \cdot \bar{B}$			$F_3 = A$			$F_4 = \bar{A} \cdot B$			$F_5 = B$		$F_6 = A \oplus B$				$F_7 = A + B$			$F_8 = \bar{A} + B$	
1	2	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	4	1	2	3	1	2
																						1	1
	1		1		1	1		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1		1	1		
1		1		1	1	1	1	1	1		1	1		1	1		1	1	1		1		
1	1	1	1	1			1	1	1	1	1		1	1	1	1			1	1	1		

Таблица 2 (продолжение)

$F_9 = \bar{A} \oplus \bar{B}$					$F_{10} = \bar{B}$			$F_{11} = A + \bar{B}$				$F_{12} = \bar{A}$			$F_{13} = \bar{A} + B$			$F_{14} = \bar{A} \cdot \bar{B}$				$F_{15} = 1$			
1	2	3	4	5	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4			
		1	1	1		1	1			1	1		1	1		1	1	1			1	1			
	1	1						1				1	1			1	1	1		1	1	1			
1		1			1	1	1	1		1	1		1		1	1	1	1	1		1	1			
1	1	1			1			1	1				1		1	1			1	1	1	1			

ющих пространственную фильтрацию оптических сигналов под управлением входных сигналов.

Схемы логических устройств, предназначенных для реализации логических функций, принимающих значение 1 при значении на входе 00, имеют три входных ячейки, расположенные в плоскости матрицы входов и пять ячеек ассоциативной матрицы АМ (рис. 1, б). СФ состоит из световодных ответвителей [6], расположенных перед матрицей входных элементов, линий задержки (ЛЗ) и переключаемого элемента (заштрихован). При одновременном действии двух или трех входных оптических сигналов переключаемый элемент становится непрозрачным к моменту их поступления на АМ, так как управляющие ответвленные сигналы поступают на него раньше. Эта задержка во времени на величину τ , равную времени включения переключаемого элемента, обеспечивается ЛЗ.

В табл. 2 приведены распределения выходных сигналов по адресам АМ всех шестнадцати ЛВ (см. табл. 1). Функции приведены в верхней строке табл. 2. Каждой последующей строке соответствует сочетание операндов первых двух столбцов табл. 1.

Логические вентили представляют собой упрощенный вариант распознающей ТОИ-системы. Упрощение заключается в уменьшении числа ячеек АМ и соответствующих им связей, отсутствии предварительной фильтрации сигналов, а при реализации логических функций $F_0, F_1, F_3, F_5, F_7, F_{15}$ — в полном отсутствии фильтрующих элементов. Последнее обстоятельство, а также отсутствие светоклапаных ячеек примерно у половины ячеек АМ, принадлежащих остальным десяти ЛВ, позволили значительно увеличить тактовую частоту и, следовательно, энергетическую добротность и плотность обработки информации.

Выполнено сравнение эффективности обработки информации ТОИ-системами с оптоэлектронными цифровыми вычислительными системами и системами цифровой электроники по таким параметрам как плотность обработки информации и энергетическая добротность. Согласно [6], для воздуш-

но-охлаждаемых интегральных схем предельное число операций в секунду (оп./с) на единицу площади схемы составляет $N=10^{10}$ оп./с. За счет параллельной организации в оптоэлектронных логических схемах [6] удается повысить производительность до $N=10^{12}$ оп./с, а в оптических цифровых многоканальных вычислительных устройствах [5] — до 10^{13} оп./с.

В оптоэлектронных схемах на основе ТОИ входной и выходной каналы к логической схеме также являются двухмерными, что обеспечивает одновременный доступ ко всем элементам схемы. В отличие от оптоэлектронных схем [6], площадь пространственно-временных модуляторов света, блокирующих часть ячеек АМ, в безлинзовых ТОИ-системах значительно меньше, уменьшается также разность хода в оптической системе (не превышает размеров оптических элементов L). Временное рассогласование для различных элементов такой системы должно быть не более определенной доли γ от тактового периода $T=1/f_{\tau}$. При $\gamma=1/30$ максимально допустимая тактовая частота $f_{\tau}=\gamma c/L=10^{10}$ Гц при $L=10^{-3}$ м, что в 10^2 раз больше, чем в [6]. Энергетическая добротность выражается числом операций на единицу затраченной энергии:

$$K=m/PT, \tag{2}$$

где m — коэффициент разветвления сигнала на выходе системы; P — мощность источника питания.

Таким образом, при тех же значениях P и m энергетическая добротность логических элементов возрастает в 10^2 раз. Плотность обработки информации прямо пропорциональна K , поэтому она также возрастает в 10^2 раз.

Параллельная обработка больших массивов данных методом ТОИ может быть организована как путем реализации картинной логики (в результате действия над двухградационными картинками на выходе также получается двухградационное изображение), так и путем использования одновременной обработки информации по нескольким спектральным каналам (логическая обработка многоградационных

картин). Количество параллельных потоков данных Ω , обрабатываемых в двумерной области, равно отношению полного количества ячеек АМ к среднему количеству ячеек одного логического вентиля. В приведенных выше примерах количество ячеек этих элементов равнялось 3—4. Если линейный размер одной ячейки АМ около 10 мкм, то АМ размером 1×1 см содержит около 10^6 ячеек и $\Omega \approx 3 \cdot 10^5$.

При использовании для параллельной обработки информации n дискретных значений длины волны $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$, количество битов, одновременно обрабатываемых каждой ячейкой, возрастет еще в n раз. Если АМ состоит из отражательных элементов, то для такой n -уровневой обработки требуется, чтобы каждая ячейка могла принимать 2^n бинарных состояний. Например, для $n=3$ это 0 0 0, 0 0 1, 0 1 0, 0 1 1, 1 0 1, 1 1 0, 1 1 1. Каждый 0 соответствует значению квадрата модуля коэффициента отражения света $|r|_{\min}^2$, а 1 — значению $|r|_{\max}^2$ на соответствующей длине волны. В работе [3] была показана достижимость таких бинарных состояний для $n=2$ и $n=3$, а в работе [4] для $n \approx 10$.

Использование двойного параллелизма (по спектру и по двумерному расположению ЛВ) при выполнении логических операций методом ТОИ позволяет осуществлять более миллиона операций за один такт, что при тактовой частоте 10^{10} Гц дает производительность матричного ТОИ-процессора 10^{16} оп./с.

Рассмотренная распознающая система, основанная на автоматическом изменении топологии оптической или гальванической связи, может одновременно выполнять функции арифметического и логического устройств при соответствующей настройке

фильтрации каналов связи на отведенных для этого участках АМ. Построение методом ТОИ простых и быстродействующих логических устройств позволяет создавать матричное арифметическое устройство с аналогичными параметрами. Эффект “многоцветной” памяти дает возможность реализовать оптическими методами параллельную логику над многоградационными переменными. Использование “многоцветного” эффекта позволяет увеличить производительность ЛВ до 10^{16} оп./с.

Преимуществом метода ТОИ является возможность реализации полного набора логической функции в однослойной ТОИ-системе, а также отсутствие проблемы линейной разделимости функций, свойственной однослойной нейронной сети.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хайкин С. Нейронные сети.— М.—С.-Петербург—Киев: Изд. дом “Вильямс”, 2006.
2. Демехин В. В., Данилов В. В. Распознавание зрительных образов на основе топологической обработки информации // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2007.— № 3.— С. 24—29.
3. Демехин В. В. Вертикальная запись информации для оптических ЗУ // Автометрия.— 1997.— № 6.— С. 67—71.
4. Демехин В. В. Обработка, передача и хранение k -уровневой информации при использовании m -частотных ($m > k$) оптических сигналов // Электромагнитные волны и электронные системы.— 2001.— № 5.— С. 64—67.
5. Вербовецкий А. А. Современные нетрадиционные методы построения цифровых многоканальных оптических логических схем // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.— 1998.— № 4.— С. 16—48.
6. Вербовецкий А. А. Современные методы создания оптической цифровой вычислительной техники // Там же.— 1999.— № 6.— С. 12—51.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Томаси У. Электронные системы связи. М.: Техносфера, 2007.— 1360 с.

Справочное руководство по современным средствам электросвязи охватывает различные аспекты технологий передачи и обработки информации, методов приема и генерации сигналов, аналоговой и цифровой модуляции, передачи по проводным и волоконно-оптическим линиям, распространения радиоволн, спутниковой, сотовой и радиорелейной связи, протоколов передачи данных, телефонии, коммутации и сигнализации.

При беспрецедентной широте охвата, материал изложен компактно, доступно, ясно и с тонким пониманием сути рассматриваемых вопросов, известной обычно только узкому кругу специалистов данного направления. В частности, обсуждаются достоинства и недостатки рассматриваемых технических решений, использованы поясняющие числовые примеры.

Издание предназначено для широкого круга читателей, включая радиолюбителей, студентов, преподавателей, разработчиков аппаратуры и проектировщиков. Особый интерес книга представляет для специалистов по системной интеграции услуг связи, предоставляя необходимую справочную информацию для комплексной оценки проектируемых сетей связи.