

КИБЕРНЕТИКА



ДЕЛА
ПРАКТИЧЕСКИЕ



ozon.ru

От издателя

В очередном - четвертом - сборнике статей известных советских ученых и специалистов рассматриваются наиболее эффективные приложения кибернетики за последнее время. Большой интерес представляет попытка ответить на вопрос: "Куда идет кибернетика?".

Показаны перспективы развития робототехники, применения искусственного интеллекта для управления, тенденции развития сверхмощных супер-ЭВМ, намечены пути создания оптического мозга, рассказывается о применении методов кибернетики в литературе, музыке и искусстве.

СОДЕРЖАНИЕ

КИБЕРНЕТИКА И ПРАКТИКА (вместо предисловия)	3
ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ	
Б. Н. Петров. Кибернетика на новом этапе	14
М. Г. Гаазе-Рапопорт. Куда идет кибернетика?	26
И. А. Апокин. Пути развития автоматизации	36
ТЕОРИЯ—ПРАКТИКЕ	
Г. Н. Волков. Качественные и количественные методы в изучении науки	50
Ю. Е. Нестерихин. О некоторых проблемах создания и применения вычислительной техники	63
Д. А. Поспелов. Семиотические модели в управлении	70
Б. Ф. Ломов. Научно-техническая революция и некоторые проблемы психологии	87
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ	
И. М. Макаров. Современные проблемы роботизации	106
А. П. Кочур. Проблемы супер-ЭВМ	113
В. М. Захарченко, Г. В. Скроцкий. Как создать оптический «мозг»	119
Э. А. Янубайтис. Рождаются сети ЭВМ	128
НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ИССЛЕДОВАНИЙ	
В. М. Глушков, Ю. М. Каныгин. Новая отрасль народного хозяйства — индустрия переработки информации	133
Г. С. Поспелов. Системный анализ и искусственный интеллект для планирования и управления	141
Б. В. Бирюков, С. Н. Плотников. Кибернетика и культура	151
Об авторах и публикациях	175

Как создать оптический мозг

В.М.Захарченко, Г.В.Скороцкий

Успехи нейрофизиологии за последние годы во многом прояснили принципы работы мозга – самого сложного и загадочного из известных нам явлений природы. По словам известного американского ученого Д.Хьюбела: «... в последнее десятилетие нейробиология стала одной из самых активных отраслей науки. Следствием этого недавно явился подлинный взрыв открытий и прозрений».

С другой стороны, 70-е годы характеризовались бурным развитием микроэлектроники, оптоэлектроники и техники оптической обработки информации. Поэтому естественны и закономерны предпринимаемые попытки использовать достижения современной техники и технологии для моделирования работы мозга и создания на этой основе принципиально новых систем обработки информации. Так, сочетание возможностей оптоэлектроники и некоторых методов оптической обработки информации позволило предложить и обосновать новую идею – идею создания оптического мозга.

Как известно, мозг состоит из нервных клеток – нейронов, связанных между собой отростками нейронов и межнейронными соединениями – синапсами. По последним данным, в мозгу не менее $5 \cdot 10^{10}$ нейронов. Несмотря на их огромное количество, тела нейронов занимают всего несколько процентов общего объема мозга. Все остальное пространство занято межнейронными связями – нервными волокнами микронной и субмикронной толщины. Каждый нейрон коры головного мозга имеет до нескольких десятков тысяч связей, по которым приходят сигналы от других нейронов. Если суммарный эффект воздействия этих сигналов превышает порог срабатывания нейрона, то он возбуждается и генерирует выходной сигнал. У нейрона выход только один, но он разветвляется на множество связей, идущих к другим нейронам. Коэффициенты передачи сигналов связей неодинаковы (и по значению, и по знаку), поэтому на другие нейроны приходят совершенно разные сигналы. Нейроны можно сравнить с диспетчерскими пунктами, принимающими и распределяющими сигналы, приходящие по межнейронным связям. Таких связей в мозгу не менее 10^{14} .

Понимание того, что синапсы относятся к основным структурным компонентам мозга, в первую очередь определяющим его функциональные характеристики, является одним из наиболее существенных выводов, сделанных нейрофизиологами. В подтверждение можно привести высказывание известного нейрофизиолога Э.Кэндела: «По убеждению многих нейробиологов, в конце концов, будет доказано, что уникальные свойства каждого человека — способность чувствовать, думать, обучаться и помнить — заключены в строго организованных сетях синаптических взаимосвязей между нейронами головного мозга».

Большую часть мозга, приблизительно 1000 см^3 из 1400 см^3 , занимает кора головного мозга. Она собрана в складки и имеет толщину около 3 мм. Вся площадь коры разбита на функциональные зоны обработки информации: зрительной, слуховой, моторной и т.д. В свою очередь, функциональные зоны разбиты на модули, площадью в доли квадратного миллиметра и высотой, равной толщине коры. Каждый модуль отвечает за обработку определенного вида сигналов, поступающих от определенных рецепторов, например участка сетчатки глаза.

Огромное разнообразие поступающей в мозг от органов чувств информации о свойствах окружающей среды отображается на множество нейронов коры головного мозга. В

зависимости от параметров поступающего сигнала и от положения его в пространстве возбуждаются те или иные участки коры. Организация коры по вертикали послойная. Каждый нейрон одного слоя связан преимущественно с нейронами другого слоя. Ансамбль возбужденных нейронов одного слоя посылает сигналы к другому слою, во втором слое также возникает ансамбль возбужденных нейронов и т.д. Каждый модуль коры представляет собой локальную нейронную сеть, которая трансформирует информацию, передавая её с входа на выход.

В такой упрощенной до предела модели мозга проблему разработки его искусственного аналога в техническом плане можно разделить на две части: создание искусственных нейронов и реализация пространственной структуры из десятков и сотен триллионов межнейронных связей.

Разработаны различные электронные модели нейронов. С помощью современной интегральной технологии всегда можно изготовить их в достаточном количестве. Воссоздать пространственную структуру связей нейронов – задача несравненно более трудная. В богатом арсенале технологии производства микроэлектронных схем нет методов, позволяющих создавать системы, каждый элемент которых имел бы тысячи и десятки тысяч связей с другими элементами системы. Причем не просто связи, а такие, каждая из которых обладает своей собственной индивидуальной проводимостью. Чтобы реализовать сложнейшую пространственную структуру из огромного числа переплетающихся связей необходимы принципиально новые решения.

Реальный практический путь решения этой проблемы лежит в оптическом моделировании нейронных структур. Световые лучи не взаимодействуют между собой, и поэтому полностью снимаются ограничения на плотность насыщения пространства оптическими каналами связи и геометрию их расположения. Для такого моделирования может быть использована техника, созданная в процессе разработки голографической памяти. С большими или меньшими изменениями могут быть использованы почти все многочисленные варианты голографической памяти, существующие на сегодняшний день. Например, в основу первой экспериментальной модели нейронной сети была положена наиболее распространенная схема голографического запоминающего устройства с газоразрядным лазером, дефлектором луча и прямоугольной матрицей голограмм. Наиболее перспективна для создания оптических моделей нейронных систем техника, использующая возможности интегральной технологии микро и оптоэлектроники. Поэтому рассмотрим в качестве примера оптическую нейронную сеть с голографической памятью на основе матриц полупроводниковых лазеров.

Информация в такой памяти записывается на светочувствительной среде в голограммах (диаметром до 1мм), собранных в матрицы. Перед матрицей голограмм расположена матрица полупроводниковых лазеров. Луч лазера, проходя через голограмму, расщепляется на множество световых лучей, расположение и интенсивность которых зависят от информации, записанной на голограмме. За матрицей голограмм на некотором расстоянии расположена матрица фотоэлементов, регистрирующих световые сигналы.

Теперь представим, что каждый лазер – это выход определенного нейрона. Его выходной сигнал – луч – расщепляется в голограмме на множество световых связей – лучей, идущих к входам нейронов следующего слоя – фотоэлементам. Световые связи различны по своему весу – интенсивности луча. Все световые сигналы, идущие к определенному нейрону, суммируются фотоэлементом, выходной сигнал которого пропорционален этому суммарному сигналу на входе. Итак, вход нейрона – это фотоэлемент, а выход лазер плюс голограмма с записанным на ней веером связей этого нейрона со всеми нейронами следующего слоя. Остается соединить вход с выходом, поместив между ними пороговый элемент, и мы получим модель нейрона.

Расположим за матрицей фотоэлементов голографической памяти ещё одну такую же так, чтобы сигналы фотоэлементов первой памяти управляли излучением матрицы полупроводниковых лазеров второй. За ней поместим третью память и т.д. В результате получим периодическую структуру, эквивалентную последовательности нейронных слоев мозга. Здесь, также как и в мозгу, поступающая на вход информация передается от слоя к слою, проходя все более высокие ступени обработки, программа которых определяется только структурой связей, записанных на голограммах. Плотность этих связей равна плотности записи информации на голограммы и составляет около 10^4 связей на 1мм^2 .

Чтобы изменить систему связей, достаточно заменить блок голограмм другим. Таким техническим преимуществом не обладает даже мозг, созданный природой. Правда он обладает другим преимуществом. Все межнейронные связи мозга гибкие, они могут изменяться в процессе обучения человека, накопления им жизненного опыта. Оптический же мозг заранее обучен, все знания его заключены в сменных блоках голограмм, в записанных на них структурах синаптических взаимосвязей. Если ставить задачу создания полного аналога человеческого мозга, то такие отличия, конечно, являются недостатком. Если же иметь в виду технические применения искусственных нейронных систем, например в робототехнике, где требуется возможность серийного производства и быстрой смены программы поведения робота, то эти отличия становятся преимуществом.

Описанная система обладает ещё одним достоинством – модульностью построения, причем модулем является блок голографической памяти. Рассмотрим возможные параметры такого модуля. Плотность записи связей на голограммы может достигать 10^6 связей на один квадратный сантиметр. Это означает, что на пластинке площадью 1см^2 можно записать 10^3 голограмм, каждая из которых имеет 10^3 связей, соединяющих 10^3 выходов нейронов одного слоя с 10^3 входами нейронов следующего слоя. Возможности современной технологии позволяют изготовить матрицу из 10^3 лазеров на площади 1см^2 . А матрица из 10^3 фотоэлементов на площади 1см^2 для современной интегральной технологии уже пройденный этап. Задача облегчается тем, что ни лазерные матрицы, ни матрицы фотоэлементов не имеют внешних электрических связей, кроме конечно питания.

Следовательно, рассмотренный модуль, назовем его оптонейронным, эквивалентен слою из тысячи нейронов с миллионом межнейронных связей, содержит матрицу из тысячи полупроводниковых лазеров, матрицу из тысячи фотоэлементов и имеет вид куба со стороной в 1см . Время срабатывания элементов модуля не более 10^6сек^{-1} , а число его элементов приблизительно соответствует числу нейронов в одном слое нейронного модуля коры головного мозга. Из модулей, как из кубиков, можно складывать сложные нейронные структуры.

Попробуем оценить размеры оптонейронной модели мозга, содержащей $5 \cdot 10^{10}$ нейронов и $5 \cdot 10^{13}$ межнейронных связей. Для построения такого оптического мозга потребуется $5 \cdot 10^7$ модулей по тысяче нейронов с общим объемом 50м^3 . Объем современных ЭВМ со всем комплектом оборудования примерно такой же. Конечно, по сравнению с человеческим мозгом, имеющим объем около $1,4\text{дм}^3$, оптический мозг проигрывает приблизительно в $3 \cdot 10^4$ раз. Но не надо забывать, что по быстродействию элементов, а следовательно и по вычислительной мощности он в $10^4 - 10^5$ раз превосходит человеческий мозг.

Теперь подсчитаем стоимость оптического мозга. Исходя из опыта крупносерийного производства интегральных микросхем, можно считать, что стоимость одного оптонейронного модуля в ближайшие годы составит 1руб . Тогда 50млн модулей будет стоить 50млн рублей. Приблизительно во столько обходятся сейчас и сверхмощные ЭВМ на $10^7 - 10^9$ операций в секунду. Но при этом эквивалентная вычислительная мощность оптического мозга намного больше.

Рассмотрим теперь другую проблему. Мало сделать оптический мозг. Чтобы вдохнуть в него жизнь, надо наполнить его информационным содержанием – определить структуру световых связей. Тогда оптический мозг оживет и будет выполнять ту работу, которая определяется характером его связей: переводить с русского на английский, или управлять космическим кораблем, или анализировать зрительные образы и т.д. Но определить структуру связей значительно сложнее, чем создать сам искусственный мозг. Тут прямая аналогия с вычислительной техникой: стоимость программного обеспечения ЭВМ в несколько раз превышает стоимость самой машины.

Существуют два основных пути для создания алгоритмов обработки информации в искусственных нейронных системах. Первый требует изучения принципов и схем переработки информации в мозгу методами нейрофизиологии. Такого рода работы активно ведутся. Примером является исследование принципов переработки в мозгу зрительной информации, выполненное американскими учеными Д.Хьюбелом и Т.Визелем, удостоенными Нобелевской премии по медицине за 1981 г. Другой путь – аналитический вывод алгоритмов, моделирующих отдельные функции мозга. К числу простейших из таких алгоритмов относятся, например, алгоритмы поиска информации по ключевым словам, используемые в большинстве действующих информационно-поисковых систем.

Рассмотрим вариант алгоритма, разработанного и практически реализованного в оптонейронной системе распознавания поисковых образов документов. Несмотря на простоту, этот алгоритм во много напоминает интеллектуальные операции, производимые человеком при поиске информации.

Представьте, что Вы ищете в каталоге библиотеки литературу по определенному запросу, например: «Конструирование транзисторных радиоприемников». Проследим, как Вы будете работать. Прежде всего Вы, конечно читаете текст запроса и в процессе чтения превращаете последовательности букв в слова, обозначающие понятия. Это первый этап обработки информации. Затем вспоминаете близкие по смыслу слова. В результате у Вас в сознании фиксируются не только слова запроса, но и многие другие ассоциирующиеся с ними слова и понятия. Например, если, просматривая каталог, Вы встретите карточку на книгу «Разработка портативной радиоаппаратуры», то, хотя эта карточка содержит слова другие, чем в запросе, Вы её отложите. Потому что слово «разработка» ассоциируется с «конструированием», слово «портативная» означает, скорее всего, что аппаратура транзисторная, и т.д. Итак, обогащение запроса – второй этап обработки информации, на котором используются Ваши знания по теме. И наконец, третий этап обработки – это оценка смысловой близости содержания карточек каталога и запроса.

Мы проанализировали процесс поиска информации человеком и выделили в нем три основные стадии. Теперь попробуем на основе этого анализа разработать структуру нейронной системы поиска информации: буквы – слова – ассоциирующееся множество слов – карточки с адресами книг. Четыре формы информации и три стадии переработки при переходе от одной формы к другой. В нейронных системах информация преобразуется при переходе от слоя к слою. Значит, наша оптонейронная система должна содержать четыре нейронных слоя и три матрицы голограмм с межнейронными связями, заполняющими три межслойных промежутка.

Первый слой – буквы. Каждый нейрон первого слоя соответствует определенной букве алфавита (с учетом её места в слове). Второй слой – слова. Каждый нейрон второго слоя соответствует определенному слову из использованного словаря. Третий слой тоже слова. И, наконец, четвертый слой – это объекты поиска – карточки каталога. Каждый нейрон четвертого слоя соответствует определенной карточке каталога.

Теперь рассмотрим межнейронные связи. Сначала связи первого и второго слоёв. Нейрон второго слоя связан с нейроном первого слоя, если соответствующая буква входит в соответствующее слово. Оптические связи второго и третьего слоёв – отображение ассоциативных связей между словами в мозгу человека. Если между двумя словами существует ассоциативная связь, то соответствующий нейрон второго слоя соединяется световой связью определенной интенсивности с соответствующим нейроном третьего слоя. Третье множество связей между словами и объектами поиска отражает содержащийся в карточках набор ключевых слов. Если в карточке есть какое-то ключевое слово, то его нейрон в третьем слое связывается световым лучом с нейроном этой карточки в четвертом слое.

Записав голограммы с межнейронными связями, мы тем самым ввели в память системы необходимую информацию. Теперь рассмотрим, как она работает. При вводе букв, из которых состоят слова запроса, возбуждаются соответствующие нейроны первого слоя. При этом включаются лазеры, стоящие на выходе этих нейронов. Голограммы расщепляют излучение лазеров на множество лучей, идущих на входы нейронов второго слоя в соответствии со схемой межнейронных соединений. В нем возбуждаются нейроны, на входы которых поступил суммарный сигнал, превышающий порог срабатывания нейронов. Ансамбль возбужденных нейронов второго слоя соответствует множеству слов запроса. Световые связи нейронов этого слоя попадают на нейроны третьего слоя и также возбуждают какую-то их часть. Ансамбль возбужденных нейронов третьего слоя соответствует ассоциирующемуся множеству слов, а ансамбль возбужденных нейронов четвертого слоя – карточкам каталога, отвечающего запросу. Лазеры, включенные на выходе нейронов этого слоя, обозначают найденные карточки.

Сопоставим возможности современной вычислительной техники, мозга человека и оптического мозга. Сравнение проведем по двум ключевым параметрам: скорости обработки информации и объёму памяти. Для ЭВМ, использующих цифровой механизм обработки информации, эти параметры определяются количеством арифметических операций в секунду и объёмом памяти в битах. Для мозга, работающего на других принципах, эти параметры не определены. Поэтому будем считать вычислительную мощность мозга равной мощности ЭВМ, которая потребуется, чтобы смоделировать его работу, а объём памяти – равным двоичной памяти ЭВМ, в которой можно записать всю информацию, хранимую в нейронных связях мозга. Это тем более естественно, что основным инструментом моделирования нейронных сетей сейчас является вычислительная техника. В память машины записывается адрес конца и адрес начала каждой связи между нейронами, её вес, пороги возбуждения нейронов и т.д.

Сигнал на выходе канала связи равен произведению входного сигнала на коэффициент передачи канала. Поэтому при передаче сигнала по межнейронной связи выполняется одна аналоговая операция умножения. Затем сигнал суммируется с остальными на входе нейрона. Значит, на каждый акт прохождения сигнала по межнейронной связи приходится одна аналоговая операция умножения и одна – сложения. Число одновременно выполняемых в мозгу операций сложения и умножения, при работе всего мозга, равно числу его межнейронных связей, а общая вычислительная мощность мозга равна числу межнейронных связей, умноженному на частоту повторения сигнала. При моделировании работы мозга на ЭВМ все эти операции выполняются цифровым способом. Необходимая для этого мощность ЭВМ не менее вычислительной мощности мозга. Если принять, что число межнейронных связей мозга равно 10^{14} , а частота повторения сигнала – 10^2 с^{-1} , то эквивалентная вычислительная мощность мозга равна 10^{16} операций в секунду.

Объём памяти определяется разрядностью двоичных чисел, кодирующих адреса связей, и общим числом связей. При 10^{14} связях разрядность адреса начала и конца каждой связи будет порядка 50 двоичных разрядов, а общий объём памяти 10^{16} бит.

Вычислительная мощность искусственного мозга, построенного из оптонейронных модулей с частотой сигнала не менее 10^6 с^{-1} , приблизительно 10^{20} операций в секунду. Обычная вычислительная мощность ЭВМ порядка 10^6 операций в секунду. Мощность отдельных уникальных ЭВМ приближается к 10^9 операций в секунду. Между значениями 10^9 и 10^{20} операций в секунду не только количественная разница, а громадный качественный скачок в технике и технологии обработки информации. Для реализации параллельных алгоритмов обработки информации, созданных природой, требуются принципиально иные технические средства, в сотни миллионов раз более мощные, чем существующие.

Именно таким требованиям отвечает идея создания оптического мозга. Почему именно оптического? Потому, что голография и оптоэлектроника – на сегодняшний день единственное реальное средство моделирования сложных пространственных структур межнейронных связей мозга. И ещё потому, что создание оптического мозга находится в пределах возможностей не завтрашней, а современной техники и технологии.