

НОВЫЕ ЭЛЕМЕНТНЫЕ БАЗЫ

1. Нейрокомпьютеры. Нейропроцессоры

Нейрокомпьютер — устройство переработки информации на основе принципов работы естественных нейронных систем. Эти принципы были формализованы, что позволило говорить о теории искусственных нейронных сетей. Проблематика же нейрокомпьютеров заключается в построении реальных физических устройств, что позволит не просто моделировать искусственные нейронные сети на обычном компьютере, но так изменить принципы работы компьютера, что станет возможным говорить о том, что они работают в соответствии с теорией искусственных нейронных сетей.

Нейрокомпьютер - это вычислительная система с MSIMD-архитектурой, в которой процессорный элемент однородной структуры упрощен до уровня нейрона, резко усложнены связи между элементами и программирование перенесено на изменение весовых коэффициентов связей между вычислительными элементами.

Нейропроцессор — это кристалл, который обеспечивает выполнение нейросетевых алгоритмов в реальном масштабе времени.

Среди разновидностей кристаллов, используемых в качестве нейропроцессоров выделим следующие:

- специализированные нейрочипы;
- заказные кристаллы;
- встраиваемые микроконтроллеры;
- процессоры общего назначения;
- перепрограммируемые логические интегральные схемы (FPGA, ПЛИС);
- процессоры цифровой обработки сигналов (ПЦОС);
- транспьютеры.

Элементной базой нейровычислительных систем являются соответственно цифровые сигнальные процессоры (DSP), ПЛИС и нейрочипы. Причем использование, как тех, так и других, позволяет сегодня реализовывать нейровычислители, функционирующие в реальном масштабе времени.

Элементной базой перспективных нейровычислителей являются нейрочипы. Их производство ведется во многих странах мира, причем большинство из них на сегодня ориентированны на закрытое использование (т.е. создавались для конкретных специализированных управляющих систем). Основные характеристики коммерчески доступных нейрочипов приведены в таблице 1.

По типу логики их можно разделить на цифровые, аналоговые и гибридные.

По типу реализации нейроалгоритмов: с полностью аппаратной реализацией и с программно-аппаратной реализацией (когда нейроалгоритмы хранятся в ПЗУ).

По характеру реализации нелинейных преобразований: на нейрочипы с жесткой структурой нейронов (аппаратно реализованных) и нейрочипы с настраиваемой структурой нейронов (перепрограммируемые).

По возможностям построения нейросетей: нейрочипы с жесткой и переменной нейросетевой структурой (т.е. нейрочипы в которых топология нейросетей реализована жестко или гибко).

Процессорные матрицы (систолические процессоры) - это чипы, обычно близкие к обычным RISC процессорам и объединяющее в своем составе некоторое число процессорных элементов, вся же остальная логика, как правило, должна быть реализована на базе периферийных схем.

В отдельный класс следует выделить так называемые нейросигнальные процессоры, ядро которых представляет собой типовой сигнальный процессор, а реализованная на кристалле дополнительная логика обеспечивает выполнение нейросетевых операций (например, дополнительный векторный процессор и т.п.).

Обобщенная классификация нейрочипов приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 - Обобщенная классификация нейрочипов

На сегодня выделяют две базовые линии развития вычислительных систем с массовым параллелизмом (ВСМП) : ВСМП с модифицированными последовательными алгоритмами, характерными для однопроцессорных фоннеймановских алгоритмов и ВСМП на основе принципиально новых сверпараллельных нейросетевых алгоритмов решения различных задач (на базе нейроматематике).

Таблица 1 - Характеристики нейрочипов.

Наименование	Фирма изготовитель	Разряд-ность, бит	Максимальное количество	Максимальное число слоев**	Примечание
--------------	--------------------	-------------------	-------------------------	----------------------------	------------

			синапсов*		
MA16	Siemens	48 (умножители и сумматоры)	-	-	400 ММАС.
NNP (Neural Networks Processor)	Accurate Automation	Nx16	-	-	MIMD, N - число процессоров.
CNAPS-1064	Adaptive Solutions	16	128 Кбайт	64	
100 NAP Chip	HNC	32	512 Кбайт	4	Плав. Арифм. 4 процессорных элемента
Neuro Matrix NM6403, Такт. частота 50 МГц.	Модуль, Россия	64 (вект. процессор), 32 RISC ядро	4096 шт.	24	Совместим с портами TMS320C4x
Neuro Matrix NM6404, Такт. частота 133 МГц.	Модуль, Россия	64 (вект. процессор), 32 RISC ядро	4096 шт.	~48	Совместим с портами TMS320C4x
CLNN 32 CLNN 64	Bellcor e	32 64	496 1024	32 нейрона	10 ⁸ перекл./с 2 x 10 ⁸ перекл./с
NC 3001	NeuriGam	16	4096 шт.	32	
ZISC 036 (Zero Instruction Set Computer)	IBM	64 разр. входного вектора	-	36 нейронов	Частота 20МГц, Векторно- прототипный нейрочип
ETANN 80170NW	Intel	64 входа	Два банка весов 64x80	64 нейрона в слое, 3 слоя.	Аналоговая
MD-1220	Micro Devices	16	64 шт.	8	8 нейронов
MT 19003 - Neural Instruction Set Processor	Micro Circuit Engineering (MCE)	16 разр. Умножитель 35 разр. сумматор	-	1	RISC МП с 7 специальными командами
Neuro Fuzzu	National Semiconductor	-	-	-	
NI 1000	Nestor	5-16 (одного нейрона)	-	1024 прототипных 256 мерных векторов	Векторно- прототипный нейрочип
LX420 (NLX 110, 230)	Adaptive Logic	16	1 Мбайт	16	16 процессорных элементов
OBL Chip	Oxford Computer	16	16 Мбайт	-	
L-Neuro 1.0 L-Neuro 2.3	Philips	16 16	1536	16 нейронов 192 (12x16)	26 МГц 60 МГц
RSC (Speech Recognition Chip) - 164	Sensory Circuits	-	-	-	
ORC 110xx (Object Recognizer Chip)	Synaptics	-	-	-	
Pram-256 Chip	UCLi Ltd.	8 (одного	-	256 нейронов	33МГц.

		нейрона)			
SAND	Datafactory	16	-	4	200 MCPS
ACC		16	-	-	
Геркулес	Россия	16	1 Мбайт	64	
Neuro Classifier	Университет Твента, DESY	70 вх. нейронов	-	6 (внутр) 1 вх., 1 вых.	2 x 1010 переключ./с
ANNA	AT&T	Число нейронных 16-256	4096 весов	-	Число входов у нейрона 256-16.
WSC (Wafer Scale Integration)	Hitachi	-	64 связи на нейрон	576 нейронов	
SASLM2	Mitsubishi	2 (одного нейрона)	-	4096(64x64) нейронов	50 МГц
TOTEM	Kent (Univer UK), di Trento (Italy)	16 (одного нейрона)	-	64 нейрона	30 МГц
Neuron 3120, Neurom 3150	Echelon (США)	8 бит (шина данных)	-	-	Наличие параллельных, последовательных и коммуникационных портов

- * - максимальное число синапсов определяет размер внутрикристалльной памяти весов.

- ** - максимальное число слоёв определяется числом операций умножения с накоплением, выполняемых за один такт для операндов длиной 8 бит.

Для оценки производительности нейровычислителей используются следующие показатели:

- CUPS (connections update per second) - число измененных значений весов в секунду (оценивает скорость обучения).

- CPS (connections per second) - число соединений (умножений с накоплением) в секунду (оценивает производительность).

- CPSPW = CPS/Nw, где Nw - число синапсов в нейроне.

- CPPS - число соединений примитивов в секунду, CPPS=CPS*Bw*Bs, где Bw, Bs - разрядность весов и синапсов.

- ММАС - миллионов умножений с накоплением в секунду.

Ориентация в выполнении нейросетевых операций обуславливает с одной стороны повышение скоростей обмена между памятью и параллельными арифметическими устройствами, а с другой стороны уменьшение времени весового суммирования (умножения и накопления) за счет применения фиксированного набора команд типа регистр-регистр.

Преимущества:

- высокое быстродействие, связанное с тем, что алгоритмы нейроинформатики обладают высокой степенью параллельности;
- нейросистемы делаются очень устойчивыми к помехам и разрушениям;

- устойчивые и надежные нейросистемы могут создаваться из ненадежных элементов, имеющих значительный разброс параметров.

Недостатки:

- они создаются специально для решения конкретных задач, связанных с нелинейной логикой и теорией самоорганизации. Решение таких задач на обычных компьютерах возможно только численными методами;
- в силу своей уникальности достаточно дорогостоящи.

Основное отличие нейрочипов от других процессоров - это обеспечение высокого параллелизма вычислений за счет применения специализированного нейросетевого логического базиса или конкретных архитектурных решений. Использование возможности представления нейросетевых алгоритмов для реализации на нейросетевом логическом базисе как раз и является основной предпосылкой резкого увеличения производительности нейрочипов.

Практическое применение:

- Управление в режиме реального времени: самолетами, ракетами и технологическими процессами непрерывного производства (металлургического, химического и др.);
- Распознавание образов: человеческих лиц, букв и иероглифов, сигналов радара и сонара, отпечатков пальцев в криминалистике, заболеваний по симптомам (в медицине) и местностей, где следует искать полезные ископаемые (в геологии, по косвенным признакам);
- Прогнозы: погоды, курса акций (и других финансовых показателей), исхода лечения, политических событий (в частности результатов выборов), поведения противников в военном конфликте и в экономической конкуренции;
- Оптимизация и поиск наилучших вариантов: при конструировании технических устройств, выборе экономической стратегии и при лечении больного.

2. Оптические компьютеры. Оптические процессоры

Оптический компьютер — это компьютер, основанный на использовании оптических процессоров. В отличие от обычных компьютеров, основанных на электронных технологиях, в оптических компьютерах операции выполняются путём манипуляции потоками оптического излучения, что позволяет достичь большей производительности вычислений.

В последнее время наблюдается большой ажиотаж вокруг оптических компьютеров: считают, что оптические компьютеры сейчас находятся на одном уровне развития с нейрокомпьютерами и квантовыми компьютерами.

Однако в кругах специалистов существует мнение, что оптический компьютер в "чистом" виде еще не разработан. На данный момент существует лишь электронно-оптический компьютер. Действительно, в компьютерах фон-Неймановской архитектуры. Широко используются оптические явления.

Схема оптического компьютера представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема оптического компьютера

Существуют два (Рисунок 4, Рисунок 5) основных способа образования изображений и ввода их в канал оптической обработки, обеспечивающих достаточно большую скорость ввода.



Рисунок 4 – Первый способ

Ввод информации в устройство оптической обработки информации с помощью голографического запоминающего устройства



Рисунок 5 – Второй способ

В блоке ввода информации используются оптические датчики. Это устройства, в которых с помощью света определяются количественные характеристики информации, например наличие/отсутствие предмета, особенности его формы, скорость, температура и т. д. Оптическим датчикам, в отличие от датчиков других типов, не требуется непосредственного контакта с наблюдаемым объектом. Кроме того, оптические датчики отличаются высокой чувствительностью и быстродействием. К устройствам такого рода относятся различные оптические считыватели (OCR-Optical Character Reader), способные непосредственно считывать вводимую в компьютер алфавитно-цифровую информацию, и сканеры изображений, непосредственно вводящие в компьютер образную информацию.

Случаев использования света в устройствах вывода информации из компьютера огромное множество - это дисплей, лазерный принтер и т. д. Пользователем их является человек, который зрительно воспринимает эту информацию - опять-таки с помощью света.

Техника записи информации с помощью света (другими словами, создание оптической памяти) в последние годы привлекала самое пристальное внимание. Большой интерес вызывает разработка голографической памяти. Самой распространенной разработкой в этой сфере являются оптические диски.

Принцип считывания информации с оптического диска заключается в облучении поверхности диска лазерным лучом и снятии информации при помощи отраженного от поверхности диска света. В будущем, по всей видимости, оптическая память вытеснит магнитную, используемую в классических компьютерах.

В блоке связи и передачи информации используется хорошо известное всем оптическое волокно. Передача информации по оптическому волокну заключается в распространении по нему света. Свет не только обладает возможностью передачи информации со скоростью, на порядок превосходящей скорость передачи электрического сигнала, но и объем информации, переданный при помощи света за единицу времени, тоже больше. Так как волоконно-оптические кабели не излучают в радиодиапазоне, то передаваемую по ним информацию трудно подслушать,

не нарушая приема-передачи. Применение оптических средств обмена информацией дает больше преимуществ, нежели обычная электрическая передача данных.

Построение оптических процессоров на основе традиционных принципов вычисления встретило большие трудности.

На рисунке 6 показан оптический процессор, реализующий произвольное матричное преобразование входного вектора-строки в выходной вектор-столбец.

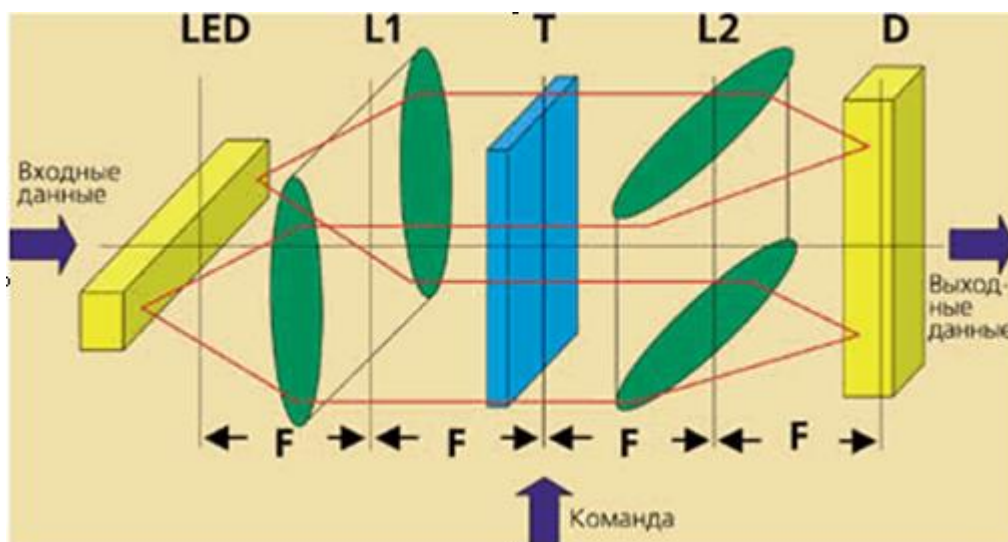


Рисунок 6 – Оптический процессор

Не слишком быстрое продвижение в построении оптических процессоров заставило разработчиков искать другие архитектуры. Разумеется - параллельные. Если уж электронные системы с массовым параллелизмом потеснили суперкомпьютеры со сверхмощным, но одним центральным процессором, то что говорить об оптических компьютерах, где распараллеливание можно осуществлять эффективно и разнообразными способами. Возникло убеждение, что не стоит заставлять оптические системы делать то, что они делают с таким трудом - то есть обрабатывать сложные алгоритмы. У оптики вообще плохо с логикой, ей лучше даются плохоформализуемые, "интуитивные" операции. Оптическая элементная база прекрасно сочетается с архитектурами искусственных нейронных сетей, которые, способны к обучению и самообучению.

Даже неуклюжие, построенные на традиционной элементной базе недавних времен, когерентные и некогерентные спецпроцессоры, в том числе оптические корреляторы, хорошо зарекомендовали себя в некоторых важных областях, вплоть до авиакосмической навигации. Многие в их технической реализации покрывает завеса таинственности: такая секретность обусловлена военными применениями.

Возможно обсуждение только реально работающих коммерческих оптических вычислительных устройств, имеет смысл остановиться на их **достоинствах**:

- передача информации со скоростью света;
- независимое распространение в свободном пространстве световых пучков, которые могут без помех пересекаться или перекрываться, что позволяет иметь до 1000 входных и выходных сигналов.
- естественная полная параллельность вычислений;
- адекватность схем обработки самому виду существования входного и выходного массива информации - двумерного изображения;
- крайне низкое энергопотребление (менее кТ на одну связь) против 108 кТ для электронных компьютеров, где k - постоянная Больцмана, а T - абсолютная температура;
- адекватность использованию интегральной (планарной) технологии, подобной технологии изготовления электронных микросхем (в том числе, СБИС);
- дополнительные возможности когерентной обработки (использование фазовых соотношений в голографических процессорах);
- нечувствительность к электромагнитным помехам;
- высокая мощность интегральных преобразований, выполняемых оптическими спецпроцессорами, и полная возможность оптической реализации как булевой алгебры, так и искусственных нейронов (порогового базового элемента).

Оптические нейрокompьютеры начинают теснить традиционные компьютеры. Зачастую в состав суперкомпьютеров вводят оптические ускорительные нейроплаты, оптические межсоединения и коммутаторы. Их преимущества особенно заметны при решении самых сложных неформализуемых задач типа распознавания изображений большой размерности, технической диагностики, прогнозов в коммерческой деятельности и многих других. Перспективны и гибридные процессоры, сочетающие достоинства оптики и электроники. Переход к оптоэлектронике позволил получить некоторые более значительные результаты.

Наиболее универсальной основой современных оптико-электронных спецпроцессоров является триада матриц:

- излучателей;
- транспарантов - пространственно-временных модуляторов света (ПВМС);
- фотоприемников.

Эти оптронные триады выполняют функции, аналогичные транзисторам и триггерам, и очень удобны при выполнении операций над многомерными векторными величинами.

Ситуация с оптическими устройствами, с одной стороны благоприятная, а с другой - удручающая. Благоприятная, поскольку простые оптические компоненты (мультиплексоры, демультиплексоры и т.п.) могут работать на тактовых частотах 40 гигагерц и более. Удручающая - потому что по части энерговыделения даже самые прожорливые полупроводники на базе арсенида галлия не идут ни в какое сравнение с многоцветными лазерами, что препятствует переходу к лазерным излучателям. Нелишне

подчеркнуть, что примитивная схемотехника оптических систем все еще оставляет желать лучшего, делая их малопригодными для реализации вычислительных машин общего назначения.

Одна из старейших архитектур, разработанных для оптических компьютеров, архитектура OPLA (Optical Programmable Logic Array) - оптическая программируемая логическая матрица. Многолетние работы по реализации этой архитектуры проводились в Японии. На оптических интегральных схемах была реализована вся булева алгебра. Считалось даже, что компьютеры 5-го и 6-го поколения будут реализованы на оптической элементной базе. Но доведение до стадии коммерчески пригодных продуктов оказалось сложнее и длительнее, чем ожидалось, и последнее время сообщений о каких-либо успехах в этом направлении не было. Сейчас считают, что перенос традиционной архитектуры, использующей принцип машины фон Неймана, на оптическую элементную базу, вряд ли перспективен. С другой стороны, один из японских ученых как-то сказал, что если бы в оптические компьютеры вкладывалась хотя бы пятая часть капитала, вложенного в разработки традиционных компьютеров, все компьютеры давно были бы оптическими. Во всяком случае, у OPLA сохраняются шансы в применениях, использующих операции декомпозиции, анализа и сжатия изображений, а также в САПР и виртуальной реальности.

Первый «коммерческий» оптический процессор Enlight256 является по принципу действия именно аналоговым (!) оптическим вычислителем. Конструктивно представляет из себя "материнскую" плату со смонтированными оптоэлектронными компонентами. Внутри "вычислительного ядра" Enlight (Рисунок 7), по сути, находится параллельная счетная машина со специализированной архитектурой, оптимальной для выполнения фактически одной задачи.



Рисунок 7 – Enlight

Ядро этого процессора – оптическое, а входная и выходная информация представляется в электронном виде. Ядро состоит из 256 VCSEL-лазеров, пространственного модулятора света, набора линз и

приемников. Производительность процессора составляет 8 триллионов операций в секунду: за один такт (8 нс) процессор умножает 256-байтный квант на матрицу 256 x 256.

3. Биокomпьютеры. Биопроцессоры

Биокomпьютер — компьютер, который функционирует как живой организм или содержит биологические компоненты и использующий в качестве вычислительных элементов белки и нуклеиновые кислоты, реагирующие друг с другом.

Создание биокomпьютеров основываются на направлении в исследовании — молекулярные вычисления.

Архитектура биокomпьютера представляет собой ряд биологических сенсоров (датчиков), которые реагируют на внешнее воздействие. Существует 4 вида датчиков, используемых в биокomпьютерах, все они необходимы для того, чтобы снабдить компьютер органами чувств: 1. **Химический**. Аналог вкусовых рецепторов. Сродни языку, химические датчики способны улавливать состав того или иного вещества, пропускаемого через фермент. 2. **Оптический**. Подобно глазам, белок может определить вид вещества и даже его форму. 3. **Механический** датчик служит для осязательных рефлексов. Благодаря такому сенсору машина может двигаться и принимать какие-либо решения после срабатывания других датчиков; 4. **Электрический сенсор** служит для передачи сигнала с датчика на следующий компонент биокomпьютера.

Ученые решили использовать в качестве биодатчиков белковые соединения. Как показали эксперименты, сферическая молекула белка способна выдерживать невероятные нагрузки и быть неприхотливой к любым внешним раздражениям (в том числе и химическим). Особенность такого датчика - упругость, которая различна во всех направлениях.

Задача **биопроцессора**, заключается в обработке сигнала и преобразовании его в цифровой вид. В обратном процессе он принимает сигнал с ЭВМ и передает его датчику (в аналоговом виде).

Процессор взаимодействует с особой структурой белка - биопамятью, которая способна накапливать колоссальные объемы информации за предельно короткое время.

Цифровая ЭВМ управляет механическими процессами (например, прекращает подачу того или иного ингредиента при его избытке). Правильнее сказать, цифровой компьютер посылает сигнал механическому биодатчику, после которого компьютер должным образом реагирует на раздражение.

Как только происходит изменение формы либо цвета белка, это мгновенно фиксирует биопроцессор, который преобразует сигнал из аналогового в цифровой вид. Такой процессор состоит из специального белкового раствора, который способен непрерывно менять свое состояние.

В устройстве биодатчика нет ничего сложного. Все подчиняется правилам обычного вычислительного процесса. Он состоит из трех шагов:

- получение входных данных;
- обработка результатов;
- исполнение какого-либо решения.

Биопроцессор состоит из специального белкового раствора, который способен непрерывно менять свое состояние. Это не что иное, как аналог транзисторного цифрового камня.

Достоинства:

1.) **Быстродействие.** Биопроцессор мгновенно принимает решения, которые не под силу цифровому процессору.

2.) **Надежность.** Если кремниевый процессор мог допускать ошибки при вычислениях, биопроцессор практически не ошибается в своих преобразованиях (максимальная относительная погрешность колеблется от 0,001 до 0,02%).

3.) **Компактность.** Размеры очень малы. Благодаря тому, что производители научились наслаивать белковую структуру, габариты такого камешка могут быть сопоставимы по размеру с каплей воды.

4.) **Исключительно низкое энергопотребление.**

Недостатки:

1.) **Трудоемкое производство;**

2.) **Высокая цена;**

3.) **Сложность со считыванием результатов** - современные способы определения кодирующей последовательности не совершенны, сложны, трудоемки и дороги;

4.) **Низкая точность вычислений,** связанная с возникновением мутаций, прилипанием молекул к стенкам сосудов и т.д;

5.) **Невозможность длительного хранения результатов вычислений** в связи с распадом ДНК в течение времени.

Очень важной составляющей биокомпьютера является машинная память. Она также имеет белковую структуру, но уже более неприхотливую. Микролазер, который прикреплен к пленке с ферментом, прожигает белок, изменяя его свойства (опять же обратимо).

Если подсчитать предельный объем такой памяти в цифровом формате, то мы получим цифру 10^{64} бит/см³, что равняется объему нескольких десятков тысяч книг. Единственный недостаток такой памяти - ее цена и трудоемкое производство.

В биодатчиках применяются белки из так называемых археобактерий. Этот вид давно интересовал ученых, так как микроорганизмы довольно активно реагировали на любые внешние изменения, не утрачивая своих жизненных свойств. Единственным недостатком является то, что в последнее время такие бактерии мутируют в непонятные микроорганизмы (видимо, сказывается экология). Лишь благодаря процессу клонирования, ученые добывают необходимое количество “правильного” белка для производства микродатчиков.

Существуют два основных вида биокomпьютеров (биопрoцессоров): **ДНК-компьютер и клеточный компьютер.**

Так же, как и любой другой процессор, ДНК-процессор характеризуется структурой и набором команд. В нашем случае структура процессора – это структура молекулы ДНК. А набор команд – это перечень биохимических операций с молекулами.

Принцип устройства компьютерной ДНК-памяти основан на последовательном соединении четырех нуклеотидов (основных кирпичиков ДНК-цепи). Три нуклеотида, соединяясь в любой последовательности, образуют элементарную ячейку памяти – кодон, совокупность которых формирует затем цепь ДНК. Основная трудность в разработке ДНК-компьютеров связана с проведением избирательных однокодонных реакций (взаимодействий) внутри цепи ДНК.

До практического применения компьютеров на базе ДНК еще очень далеко. Однако в будущем их смогут использовать не только для вычислений, но и как своеобразные нанофабрики лекарств. Поместив подобное «устройство» в клетку, врачи смогут влиять на ее состояние, исцеляя человека от самых опасных недугов.

Клеточные компьютеры представляют собой самоорганизующиеся колонии различных "умных" микроорганизмов, в геном которых удалось включить некую логическую схему, которая могла бы активизироваться в присутствии определенного вещества. Для этой цели идеально подошли бы бактерии, стакан с которыми и представлял бы собой компьютер. Такие компьютеры очень дешевы в производстве. Им не нужна столь стерильная атмосфера, как при производстве полупроводников.

Главным свойством компьютера такого рода является то, что каждая их клетка представляет собой миниатюрную химическую лабораторию. Если биоорганизм запрограммирован, то он просто производит нужные вещества. Достаточно вырастить одну клетку, обладающую заданными качествами, и можно легко и быстро вырастить тысячи клеток с такой же программой.

Основная проблема, с которой сталкиваются создатели клеточных биокomпьютеров, - организация всех клеток в единую работающую систему.

Применение:

- в науке;
- в образовании;
- во всех системах управления, проектирования;
- в прогнозировании и т.д.