

Физические пределы быстродействия компьютеров

Презентацию
составлял ученик 10А
класса
Ковалевский Степан

По материалам зарубежной печати ("New Scientist", Annals of the New York Academy of Sciences).

- Стремительный прогресс в развитии компьютерной техники за последние десятилетия невольно заставляет задуматься о будущем компьютеров. Останутся ли они прежними или изменятся до неузнаваемости? Сегодня много говорят о том, что традиционные полупроводниковые ЭВМ скоро себя исчерпают. Ожидается, что уже через пять—десять лет их потеснят более мощные молекулярные (см. "Наука и жизнь" № 12, 2000 г.), квантовые (см. "Наука и жизнь" № 1, 2001 г.), биологические и другие, весьма экзотические, вычислительные устройства. Сет Ллойд, физик из Массачусетского технологического института (США), идет в своих прогнозах дальше всех. Он считает, что компьютер будущего не будет иметь ничего общего ни с одной из ныне существующих или только еще разрабатываемых вычислительных машин. Скорее, он превратится в нечто вроде огненного шара или даже черной дыры.

По материалам зарубежной печати ("New Scientist", Annals of the New York Academy of Sciences).

- Что за чепуха, — скажете вы, — разве можно поместить на рабочий стол раскаленный шар или черную дыру, да и как они могут производить вычисления?!
- Прежде чем прийти к столь экстравагантным выводам, Ллойд задал себе вопрос: до каких пор будут уменьшаться размеры вычислительных устройств и возрастать их быстродействие? Уже более тридцати лет развитие компьютеров подчиняется эмпирическому закону, сформулированному Гордоном Муром в 1965 году, согласно которому плотность транзисторов на микросхеме удваивается за 18 месяцев. С каждым годом следовать "закону Мура" становится все труднее, поэтому его близкий конец предсказывался уже неоднократно. Однако человеческий гений и изобретательность находят все новые оригинальные выходы из технологических и производственных сложностей, встающих на пути безудержной "компьютерной гонки". И все же, считает Ллойд, прогресс вычислительной техники не может продолжаться вечно, рано или поздно мы наткнемся на предел, обусловленный законами природы.
- Каков же будет самый последний, самый мощный, "предельный" компьютер? Вряд ли сегодня можно предугадать, как именно он будет устроен. Но для нас это не принципиально, говорит Ллойд, технологические детали — задача инженеров будущего. Важно понимать, что любое вычисление — это прежде всего некий физический процесс. Поэтому задачу "о предельном компьютере" следует решать путем рассмотрения основных физических принципов и величин — таких как энергия, температура, объем.

Предел первый: быстродействие

- Все логические операции, осуществляемые компьютером, основаны на переключении битов между условными значениями "0" и "1", которым отвечают два устойчивых физических состояния. Это могут быть, к примеру, большее или меньшее сопротивление проводящего канала в транзисторе (обычный, или полупроводниковый, компьютер), та или иная структура молекулы (молекулярный компьютер), значения спина атома (квантовый компьютер) и т.д. Во всех случаях скорость переключения битов и, быстродействие вычислительного устройства определяются тем, насколько быстро протекает на соответствующих траекториях гамма-фотонов столкновения друг с другом, а также больше подвижность электронов в полупроводнике, скорость перехода молекулы из одной формы в другую определяется вероятностью этого события и т. д. Времена процессов переключения, как правило, очень малы (от 1 до 10-15 секунды). И все же они конечны.
- С точки зрения квантовой механики, утверждает Сет Ллойд, скорость вычислений ограничена полной доступной энергией. В 1998 году это положение было теоретически доказано физиками из Массачусетского технологического университета (США) Норманом Марголусом и Львом Левитиным. Им удалось показать, что минимальное время переключения бита равно одной четверти постоянной Планка, деленной на полную энергию:

$$\frac{1}{4} \frac{h}{E}$$

Предел первый: быстродействие

- Таким образом, чем больше энергия компьютера, используемая им для вычислений, тем быстрее он считает. По мнению Ллойда, “пределный компьютер” — это такой компьютер, вся энергия которого будет расходоваться только на вычислительный процесс.
- Исходя из приведенного соотношения, оценим, к примеру, быстродействие некоего гипотетического компьютера массой один килограмм, состоящего всего из одного бита. Как известно, полная энергия тела задается фундаментальным соотношением $E=mc^2$, где m — масса, c — скорость света в вакууме. Итого, имеем 10^{17} Джоулей. Если бы всю эту энергию, “погребенную” в массе нашего компьютера, можно было бы использовать в вычислительном процессе, время переключения бита достигло бы фантастически малых величин порядка 10^{-51} секунды! Полученное значение существенно меньше называемого “планковского промежутка времени” (10^{-44} секунды) — минимального временного интервала, который, с точки зрения квантовой теории гравитации, требуется для протекания любого физического события. “Это довольно-таки странно”, — говорит Ллойд...
- Однако мы рассмотрели однобитный компьютер, в то время как на практике любой ЭВМ требуется не один, а множество битов. Если энергию нашего гипотетического компьютера распределить между миллиардом битов, время переключения каждого из них будет уже меньше планковского. “Важно, что при этом общее число переключений всех битов за секунду останется прежним — 10^{51} ”, — отмечает Ллойд.
- По сравнению с “пределным” компьютером Ллойда нынешние ЭВМ — просто черепахи: при тактовой частоте порядка 500 мегагерц типичный современный компьютер выполняет лишь 10^{12} операций в секунду. “Пределный” компьютер работает в 10^{39} раз быстрее! А если он будет весить не килограмм, а тонну, быстродействие возрастет еще в 1000 раз.

Предел первый: быстродействие

- В чем причина медлительности современных ЭВМ? Все дело в том, — считает Ллойд, — что полезную работу в них совершают лишь электроны, перемещающиеся внутри транзисторов. Что касается основной массы компьютера, то она не только не используется как источник энергии, но, напротив, препятствует свободному движению носителей заряда. Единственная ее функция — поддерживать ЭВМ в стабильном состоянии.
- Как избавиться от “бесполезной” массы? Надо превратить ее в кванты электромагнитного излучения — фотоны, которые, как известно, не имеют массы покоя (считается, что она равна нулю). Тогда вся энергия, запасенная в массе, перейдет в энергию излучения, и компьютер из неподвижного серого ящика превратится в светящийся огненный шар! Как ни странно, но именно так может выглядеть “предельный” компьютер, утверждает Ллойд. Его вычислительная мощность будет огромна: менее чем за одну наносекунду он сможет решать задачи, на которые у современных ЭВМ ушло бы время, равное жизни Вселенной!
- Заметим, что до сих пор все наши рассуждения касались только быстродействия “предельного” компьютера, но мы забыли о такой важной его характеристике, как память. Существует ли предел запоминающей способности вычислительных устройств?

Предел второй: память

- Память компьютера ограничена его *энтропией*, утверждает Сет Ллойд, то есть степенью беспорядка, случайности в системе. В теории информации понятие энтропии — аналог понятия *количества информации*.
- Величина энтропии (S) пропорциональна натуральному логарифму числа различных состояний системы (W): $S = k \cdot \ln W$, где k — постоянная Больцмана. Смысл этого соотношения очевиден: чем больший объем информации вы хотите сохранить, тем больше различных состояний вам потребуется. Например, для записи одного бита информации необходимо два состояния: "включено" и "выключено", или "1" и "0". Чтобы записать 2 бита, потребуется уже 4 различных состояния, 3 бита — 8, n битов — 2^n состояний. Таким образом, чем больше различных состояний в системе, тем выше ее запоминающая способность.

Предел второй: память

- Чему равна энтропия “предельного” компьютера Ллойда?
- Во-первых, она зависит от объема компьютера: чем он больше, тем большее число возможных положений в пространстве могут занимать его частицы. Допустим, объем нашего компьютера равен одному литру. Во-вторых, необходимо знать распределение частиц по энергиям. Поскольку речь идет о светящемся шаре, можно воспользоваться готовым расчетом, выполненным еще лет сто назад Максом Планком при решении задачи о так называемом абсолютно черном теле. Что же мы получим? Оказывается, литр квантов света может хранить около 10^{31} битов информации — это в 10^{20} раз больше, чем можно записать на современный 10-гигабайтный жесткий диск! Откуда такая огромная разница? “Все дело в том, — говорит Ллойд, — что способ, которым в современных компьютерах записывается и хранится информация, чрезвычайно неэкономичен и избыточен. За хранение одного бита отвечает целый “магнитный домен” — а ведь это миллионы атомов”.

От раскаленного шара — к черной дыре

- Итак, подведем итоги. Пытаясь выяснить пределы быстрогодействия и запоминающей способности вычислительного устройства, мы сначала избавились от лишней массы (1 килограмм), переведя ее в энергию квантов света, а затем каким-то образом запихнули все это в объем, равный 1 литру. В этих условиях температура огненного шара должна достигать миллиарда градусов (!), а излучать он будет гамма-кванты. Что ни говори, наш “пределный” компьютер получился довольно-таки странным... “Как управлять такой огромной энергией — вот в чем проблема”, — справедливо замечает Ллойд.

От раскаленного шара — к черной дыре

- Но, допустим, каким-то образом нам все же удалось обуздать раскаленный “супчик” из гамма-квантов, заперев его в некоем “ящике”. Тогда работа “предельного” компьютера могла бы выглядеть следующим образом. Информация хранилась бы в положениях и с небольшим количеством образующихся при столкновениях электронов и позитронов. Считывать информацию было бы совсем несложно. “Достаточно просто открыть “окошко” в стенке “ящика” и выпустить фотоны, — говорит Ллойд. — Вылетев наружу со скоростью света, они тут же попадут в детектор гамма-излучения, где и будет считано их состояние”. Для ввода информации потребуются управляемый генератор гамма-излучения. Конечно, все эти устройства ввода-вывода неизбежно привнесут с собой и “лишнюю” массу, от которой мы так хотели избавиться. Но Ллойд полагает, что в будущем, возможно, удастся сделать эти приборы очень маленькими и легкими.

От раскаленного шара — к черной дыре

- Однако, как бы мы ни совершенствовали процесс ввода-вывода, описанная модель “предельного” компьютера имеет один принципиальный недочет. Допустим, максимальный размер (например, диаметр) нашего компьютера равен 10 сантиметрам. Поскольку фотоны движутся со скоростью света, то все 10^{31} битов информации, хранящейся в нашем компьютере, не могут быть “скачаны” из него быстрее, чем за время, требующееся свету для прохождения расстояния в 10 сантиметров — то есть за $3 \cdot 10^{-10}$ секунды. Значит, максимальная скорость обмена информацией компьютера с внешним миром равна 10^{41} бит в секунду. А предельная скорость обработки информации, как мы уже выяснили раньше, составляет 10^{51} бит в секунду, что в десять миллиардов раз быстрее. Таким образом, необходимость связи компьютера с внешним миром, а также отдельных его частей друг с другом будет приводить к существенным потерям в скорости вычислений. “Отчасти решить эту проблему можно, заставив куски компьютера работать независимо друг от друга, в параллели”, — отмечает Ллойд.

От раскаленного шара — к черной дыре

- Слишком медленный ввод-вывод информации затрудняет коррекцию ошибок в процессе вычислений. В нашей модели “предельного” компьютера для устранения ошибки придется извлечь наружу соответствующие биты, а вместо них поместить туда новые. Мы сможем проделывать эту операцию не чаще 10^{41} раз в секунду, тогда как за это же время компьютер обработает 10^{51} битов. Таким образом, лишь одна десятиллиардная часть информации будет проверяться на наличие ошибок. Придется либо слепо доверять точности расчетов, либо снижать скорость вычислений.
- Есть ли способ повысить скорость ввода-вывода? “Да, — говорит Ллойд, — надо уменьшать размеры компьютера”. Тогда обмен информацией будет происходить быстрее, а объем памяти станет меньше. При этом доля последовательных операций в компьютере может возрасти, а доля параллельных — уменьшиться.

От раскаленного шара — к черной дыре

- Что произойдет, если мы начнем сжимать “сгусток” гамма-квантов, температура которого равна миллиарду градусов, а объем одному литру? По мере сжатия температура станет еще выше, в результате чего в объеме компьютера начнут рождаться новые, еще более экзотические частицы. “Компьютеры будущего могут превратиться в релятивистские устройства высокой энергии наподобие ускорителей элементарных частиц”, — полагают Вальтер Симмонс и его коллеги Сандип Пакваса и Ксерксес Тата из университета Гавайи, исследующие возможность компьютерных вычислений на уровне элементарных частиц. “По мере роста температуры в компьютере наши знания о том, что происходит у него внутри, становятся все более и более шаткими”, — говорит Ллойд.
- Но, к счастью, наступит момент, когда все опять станет “просто”. Сжатый до некоторого предельного значения “компьютер” превратится... в черную дыру. Один килограмм первоначального вещества “схлопнется” в объем менее чем 10^{-27} метров в поперечнике! Ну это уж чересчур, — скажете вы, — о каком еще компьютере можно после этого говорить?! Оказывается, можно...

От раскаленного шара — к черной дыре

- Как известно, черная дыра — это область чрезвычайно сильного гравитационного поля, “всасывающая” в себя всю окружающую материю. Оказавшись вблизи так называемого *горизонта событий* черной дыры, ни одно тело, даже свет, уже не может ее покинуть (см. “Наука и жизнь” № 8, 2000 г.). Однако это не совсем так. В 1970 году Стефан Хокинг из Кембриджского университета теоретически показал, что черные дыры должны испаряться — испускать кванты света и элементарные частицы за *горизонт событий*. Если черные дыры все же излучают, то, согласно законам термодинамики, они имеют энтропию, а значит, могут запасать в себе информацию.
- Энтропия черной дыры была вычислена в 1972 году Яковом Бекенштейном. Согласно его расчетам, черная дыра массой один килограмм может хранить примерно 10^{16} бит.
- Но с тех самых пор, как информация попадает в черную дыру, она становится недоступной для остальной части Вселенной. Значит, использовать черную дыру для каких-либо вычислений в принципе невозможно — мы все равно не сможем извлечь из нее полученный результат. Однако, с точки зрения теории струн (см. “Наука и жизнь” № 4, 1998 г.), не все так безнадежно. Гордон Кейн, физик-теоретик из университета штата Мичиган (США), полагает, что информацию о том, как формировалась черная дыра все же можно добыть. Сет Ллойд считает, что она остается записанной на горизонте событий в форме сжатых струн, “наподобие сплюснутых спагетти”.

От раскаленного шара — к черной дыре

- Если это действительно так, то черная дыра — и есть “предельный” компьютер, причем благодаря его ничтожно малым размерам скорость вычислений и скорость обмена информацией достигнут одного и того же, максимального, значения. Тем самым проблема ввода-вывода будет решена. “Черная дыра — самый мощный последовательный компьютер”, — считает Ллойд.
- Представить себе, как может работать “чернодырный” компьютер еще сложнее, чем в случае раскаленного шара из гамма-квантов. По всей видимости, на вход его будет подаваться материя в некоем исходном состоянии, программа задаст точный сценарий ее коллапса в черную дыру, а результатом станет анализ излучения вспышки черной дыры, взрывающейся в результате испарения. “Предельный” компьютер — хоть и мощное, но одноразовое устройство: решив задачу, он исчезнет.
- ***
- Лишь после того, как компьютер превратится в пылающий огненный шар либо в микроскопическую черную дыру, — утверждает Ллойд, — прогресс вычислительной техники прекратится. Фантастика? Нет, “еще одно свидетельство тесной связи физики и теории информации”. Конечно, сегодня мы даже не можем себе представить, как достичь этих невероятных пределов. Однако не стоит отчаиваться — доверьтесь человеческому гению. Если развитие ЭВМ будет идти теми же темпами, все описанное станет реальностью через каких-нибудь две сотни лет.