Количественный анализ вычислительной способности компьютеров разных типов

Ю.И. Поляков
Аспирант кафедры прикладной математики и кибернетики СибГУТИ
e-mail: polyakov1987@yandex.ru

Аннотация

В работе Рябко Б.Я. «Using Information Theory to Study Efficiency and Capacity of Computers and Similar Devices» предложен новый подход к определению вычислительной способности компьютеров и им подобных устройств (кластеров, мобильных телефонов и т.п.). В докладе этот метод используется для определения вычислительной способности трех компьютеров с процессорами Intel 80286, Intel 80386 и Intel 80486, а так же для сравнительного анализа влияния различных характеристик компьютеров на эту величину.

1. Введение

В настоящее время существует множество подходов для оценки производительности вычислительных задач. В основном все подходы сводятся к изучению ресурсов (время выполнения задачи, объем используемой памяти, длина программы) используемых для решения задачи.

На много менее изучены возможности теоретической оценки вычислительной способности самого компьютера и устройств подобных ему (кластеров, мобильных телефонов и т.п.). В настоящее время вычислительная способность компьютера оценивается эмпирически, для этого на нем запускают набор тестовых вычислительных задач, так называемых «benchmark», суммарное время выполнения которых на компьютере и является оценкой его вычислительной способности.

В работе [1] описан новый теоретический подход для определения вычислительной способности реальных компьютеров с разными характеристиками, такими как тактовая частота процессора, количество ядер процессора, организация памяти и набор инструкций процессора. Для оценки вычислительной способности компьютера предлагается использовать набор команд процессора и время их выполнения, включая временные задержки при обращении к разным видам памяти (кэш-памяти, оперативной памяти и т.д.), а так же задержки связанные с перезагрузкой конвейера и сменой контекста процессора. В основе данного подхода лежит концепция энтропии Шеннона, емкость дискретного канала без шума и другие идеи Шеннона, которые включает в себя теория информации.

Модель, описанная в работе [1], представляет большой практический интерес не только для теоретической оценки производительности уже существующих и используемых вычислительных систем, но так же для расчета и анализа вычислительной способности систем, находящихся на стадии проектирования, для которых не могут быть применены эмпирические методы оценки.

В работе ставится цель проверить указанную выше модель на практике и сравнить теоретические результаты с практическими данными. Для проверки модели использовались три компьютера с процессорами Intel 80286, Intel 80386 и Intel 80486, для которых известно полное описание и известны эмпирические данные об их производительности.

2. Вычислительная способность компьютера

2.1 Основные идеи и определения

В работе [1] описана упрошенная модель компьютера, согласно этой модели компьютер состоит из набора инструкций процессора I и доступной памяти M. Каждая отдельная инструкция процессора $x \in I$ это совокупность имени команды и операндов этой команды, таких как индексы регистров и адреса ячеек памяти. Например, инструкции, имеющие одинаковые имена команд, но разные значения операндов будут входить в I как разные.

Вычислительная задача P определяется некоторой последовательностью инструкций $X(P) = x_1 x_2 x_3 \ldots x_n$, где $x_i \in I$. Например, задача P содержит цикл, который выполнится десять раз, тогда последовательность X будет содержать тело цикла, повторяющееся десять раз. Не все последовательности инструкций являются допустимыми, могут быть запрещенные последовательности. Например, вероятно существование недопустимых пар инструкций, другими словами последовательность возможно должна удовлетворять некоторым ограничениям. Определим набор из всех допустимых последовательностей инструкций, как S_c и будем, рассматривать две разные последовательности из S_c, как две разные вычислительные задачи.

Время выполнения инструкции x обозначается как $\tau(x)$. Тогда время выполнения $\tau(X)$ последовательности инструкций $X(P) = x_1 x_2 x_3 \ldots x_t$ определяется как:

$$\tau(X) = \sum_{i=1}^{t} \tau(x_i)\,.$$

Главное наблюдение заключается в том, что число разных вычислительных задач, чьё время выполнения равно T эквивалентно размеру множества всех последовательностей инструкций, чьё время выполнения равно T, т.е.

$$\nu(T) = N(T)\,, \tag{1}$$

где $\nu(T)$ количество разных проблем, чьё время выполнения равно T, и

$$N(T) = \left|\{X : \tau(X) = T\}\right|. \tag{2}$$

Поэтому,

$$\log \nu(T) = \log N(T)\,. \tag{3}$$

(Здесь и ниже T это целое число, $\log x \equiv \log_2 x$ и $|Y|$ это количество элементов Y, если Y это множество, и длине Y, если это слово.) Другими словами, общее количество задач выполняющихся за время T равно выражению (2). Исходя из этих соображений дается следующее определение.

Определение 1. Пусть есть компьютер с набором инструкций I и пусть $\tau(x)$ будет время выполнения для инструкции $x \in I$. Вычислительная способность $C(I)$ будет определяться как:

$$C(I) = \lim_{T\to\infty} \frac{\log N(T)}{T}\,. \tag{4}$$

Утверждение 1. Предел (4) существует, если I конечное множество, времена выполнения $\tau(x)$, $x \in I$ целые числа и наибольший делитель $\tau(x)$, $x \in I$ равен *1*.

Доказательство утверждения приводится в работе [1].

2.2 Метод для оценки вычислительной способности

Простейшая оценка вычислительной способности может быть получена, если предположить, что все последовательности инструкций являются допустимыми. Иными словами, рассмотрим набор инструкций I, как алфавит и предположим, что все последовательности букв (инструкций) могут быть выполнены. В таком случае может быть использован метод вычисления пропускной способности канала без потерь предложенный Шенноном в [2]. Важно отметить, что этот метод может быть использован для нахождения верхней границы вычислительной способности для всех других моделей, потому что для любого компьютера множество допустимых последовательностей инструкций это подмножество всех слов над «алфавитом» I.

Как и ранее, есть компьютер с набором инструкций I, чьё время выполнения $\tau(x)$, $x \in I$, и все последовательности инструкций являются разрешенными. Другими словами, если набор I рассматривается как алфавит, то все возможные слова над этим алфавитом можно рассматривать в качестве допустимых последовательностей инструкций для компьютера. В этом случае вычислить (оценить) вычислительную способность (4) можно при помощи решения предложенного Шенноном, он показал, что $C(I)$ равна логарифму от наибольшего действительного решения X_0 следующего уравнения:

$$X^{-\tau(x_1)} + X^{-\tau(x_2)} + \ldots + X^{-\tau(x_S)} = 1, \qquad (5)$$

где $I = \{x_1, \ldots, x_S\}$. Иными словами, $C(I) = \log X_0$.

3. Практическое применение метода

3.1 Вычислительная способность компьютеров на базе процессоров Intel 80286, Intel 80386 и Intel 80486

В таблице 1 приведено описание технических характеристик сравниваемых процессоров.

Таблица 1. Технические характеристики сравниваемых пороцессоров.

Характеристика	Intel 80286	Intel 80386	Intel 80386
Тактовая частота (МГц)	12.5	20	66
Разрядность регистров (бит)	16	32	32
Разрядность шины данных (бит)	16	32	32
Разрядность шины адреса (бит)	24	32	32
Объём адресуемой памяти	16 Мбайт	4 Гбайт	4 Гбайт
Объем оперативной памяти	1 Мбайт	4 Мбайт	8 Мбайт
Кеш L1	-	-	8 Кбайт, на кристалле
Кеш L2	-	-	128 Кбайт, на материнской плате

Для применения метода описанного в работе [1] на практике необходимо знать полный набор команд процессора и время их выполнения [3], объем кэш памяти, если она есть и объем оперативной памяти, а так же знать структуру машинных команд процессора[4]. На рисунке 1 приведен формат команд процессоров серии x86, к которым относятся и выше названные образцы.

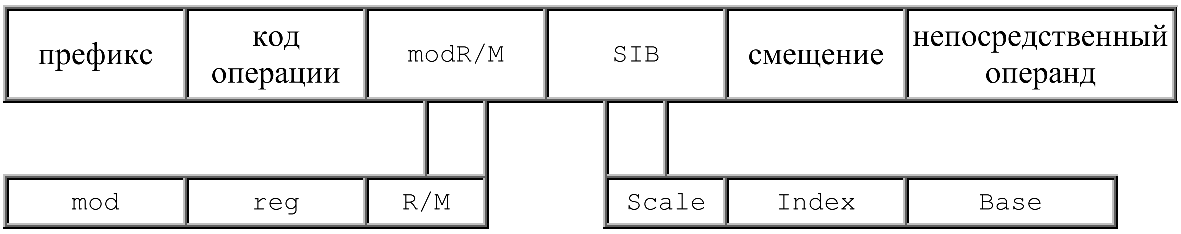

Рис.1. Формат команд процессора x86 фирмы Intel

Полный разбор формата команд займет много времени, поэтому приводится его краткое описание . *Префикс* – инструкция может содержать до четырех префиксов (или не содержать ни одного) размер каждого из которых – 1 байт. *Код операции* – поле содержит одно или двух байтный код инструкции. *ModR/M* – однобайтное поле задает требуемый способ адресации, и специфицирует используемые регистры. *SIB* – однобайтовое поле SIB расшифровывается как Scale-Index-Base и уточняет метод адресации. *Смещение* – в зависимости от метода адресации это поле занимает один, два или четыре байта и содержит смещение операнда. *Непосредственный операнд* – непосредственный операнд занимает один, два или четыре байта.

Перейдем к составлению уравнения (5) для Intel 80286, так как уравнение очень громоздкое, рассмотрим только принципы, составим уравнение только для команды ADD. В таблице 2 приведено время выполнения команды ADD с разными операндами для всех трех процессоров.

Таблица 2. Время выполнения команды ADD

Операнды	Intel 80286	Intel 80386	Intel 80386
Регистр, регистр (в тактах)	2	2	1
Память, регистр (в тактах)	7	7	3
Регистр, память (в тактах)	7	6	2
Регистр, константа (в тактах)	3	2	1
Память, константа (в тактах)	7	7	3

Первое слагаемое инструкция ADD с двумя регистрами в качестве операндов, в процессоре имеется 8 регистров общего назначения, и только регистры общего назначения могут быть операндами команды ADD. Так как считается, что все последовательности инструкций допустимы, то всего может быть 64 разных комбинаций регистров (8 регистров в первом операнде и восемь во втором). Еще следует учесть два бита состояния, один из них отвечает, в какой операнд будет сохраняться результат, а второй указывает процессору с целым словом ему работать или только с половиной. То есть всего возможных команд ADD с двумя регистрами у нас будет $2^3 \cdot 2^3 \cdot 2^2$. Первое слагаемое для уравнения будет иметь вид

$2^3 \cdot 2^3 \cdot 2^2 \cdot \frac{1}{x^2}$. Следующие возможные операнды это память и регистр, стоит обратить внимание, что в машинные инструкции память-регистр и регистр-память равнозначны, так как соответствующие команды в машинном представлении будут различаться всего одним битом, который мы учитывали для регистров, поэтому эти инструкции можно записать как одно слагаемое. Размер памяти, которую можно адресовать, равен 2^{20}, с учетом регистра и двух бит состояния получается слагаемое для уравнения $2^{20} \cdot 2^3 \cdot 2^2 \cdot \frac{1}{x^7}$. Остались инструкции в качестве операнда, у которых выступает константа. Все возможные значения констант для нашего процессора это 2^{16} и это большое значение, если обратить внимание на таблицу 2, операции регистр-константа выполняются значительно быстрее, чем команды регистр-память, хотя возможных значений констант не на много меньше, чем адресуемая память. Вообще констант в программах встречается очень мало относительно цифры 2^{16} и если, записать слагаемое с константами в уравнение, то получится, будто бы используется память намного быстрее оперативной и немного меньше ее по размеру, чего на самом деле конечно же нет. Поэтому принимается решение команды с константами игнорировать, так как реальное количество констант ни как не повлияет на вычислительную способность компьютера. В итоге уравнение для команды ADD следующее:

$$2^3 \cdot 2^3 \cdot 2^2 \cdot \frac{1}{x^2} + 2^{20} \cdot 2^3 \cdot 2^2 \cdot \frac{1}{x^7} = 1$$

Полное уравнение для *Intel 80286* выглядит следующим образом:

$$\frac{9}{x^2} + \frac{6}{x^3} + \frac{1}{x^5} + \frac{1}{x^8} + \frac{1}{x^{14}} + \frac{1}{x^{16}} + 2^3 \cdot 2^3 \cdot 2^2 \cdot \left(\frac{5}{x^2} + \frac{1}{x^5} + \frac{1}{x^{10}} + \frac{2}{x^{14}}\right) + 2^{20} \cdot 2^3 \cdot 2^2 \cdot$$
$$\cdot \left(\frac{1}{x^5} + \frac{1}{x^6} + \frac{6}{x^7} + \frac{1}{x^{11}} + \frac{2}{x^{16}}\right) + 2^3 \cdot \left(\frac{5}{x^2} + \frac{1}{x^3} + \frac{2}{x^{13}} + \frac{1}{x^{14}} + \frac{3}{x^{17}} + \frac{2}{x^{21}} + \frac{1}{x^{22}} + \frac{1}{x^{25}}\right) +$$
$$+ 2^{20} \cdot \left(\frac{1}{x^6} + \frac{4}{x^7} + \frac{1}{x^{11}} + \frac{1}{x^{12}} + \frac{2}{x^{16}} + \frac{1}{x^{17}} + \frac{2}{x^{19}} + \frac{1}{x^{20}} + \frac{2}{x^{24}} + \frac{1}{x^{25}} + \frac{1}{x^{38}}\right) + \frac{32}{x^3} +$$
$$+ \sum_{i=1}^{6} \frac{32}{x^{7+i}} + \frac{3}{x^4} + \sum_{i=1}^{6} \frac{3}{x^{8+i}} = 1$$

Его решение X_0 равно 42.27, $C(I) = \log 42.27 = 5.402$.

В уравнении под суммой находятся слагаемые, время выполнения, которых может меняться в зависимости от каких либо факторов.

Полное уравнение для *Intel 80386*:

$$\frac{7}{x^2} + \frac{3}{x^3} + \frac{5}{x^4} + \frac{2}{x^5} + \frac{1}{x^{12}} + \frac{1}{x^{13}} + \frac{1}{x^{15}} + \frac{1}{x^{17}} + \frac{1}{x^{19}} + 2^3 \cdot 2^3 \cdot 2^2 \left(\frac{4}{x^2} + \frac{1}{x^{15}} + \frac{1}{x^{20}} + \frac{1}{x^{22}} + \frac{1}{x^{38}}\right)$$
$$+ 2^{22} \cdot 2^3 \cdot 2^2 \left(\frac{8}{x^4} + \frac{3}{x^5} + \frac{4}{x^6} + \frac{7}{x^7} + \frac{1}{x^{16}} + \frac{1}{x^{21}} + \frac{1}{x^{22}} + \frac{1}{x^{25}} + \frac{1}{x^{41}}\right) +$$
$$+ 2^3 \cdot \left(\frac{2}{x^2} + \frac{1}{x^{10}} + \frac{2}{x^{14}} + \frac{1}{x^{19}} + \frac{1}{x^{20}} + \frac{2}{x^{22}} + \frac{1}{x^{27}} + \frac{2}{x^{38}} + \frac{1}{x^{43}}\right) +$$
$$+ 2^{22} \cdot \left(\frac{2}{x^6} + \frac{2}{x^{11}} + \frac{1}{x^{13}} + \frac{2}{x^{17}} + \frac{1}{x^{22}} + \frac{1}{x^{24}} + \frac{2}{x^{25}} + \frac{1}{x^{30}} + \frac{2}{x^{41}} + \frac{1}{x^{46}}\right) +$$
$$+ \frac{32}{x^3} + \sum_{i=1}^{10} \frac{32}{x^{7+i}} + \frac{5}{x^5} + \sum_{i=1}^{10} \frac{5}{x^{11+i}} = 1$$

Его решение X_0 равно 182.564, $C(I) = \log 182.564 = 7.512$.

Уравнение для *Intel 80486*:

$$\frac{1}{x^1}+\frac{5}{x^2}+\frac{7}{x^3}+\frac{2}{x^4}+\frac{2}{x^5}+\frac{1}{x^7}+\frac{1}{x^{12}}+\frac{1}{x^{14}}+\frac{1}{x^{15}}+\frac{1}{x^{17}}+2^3\cdot 2^3\cdot 2^2\cdot$$
$$\cdot\left(\frac{4}{x^1}+\frac{1}{x^3}+\frac{6}{x^6}+\frac{1}{x^8}+\frac{1}{x^9}+\frac{1}{x^{11}}\right)+2^{13}\cdot 2^3\cdot 2^1\cdot\left(\frac{1}{x^1}+\frac{5}{x^2}+\frac{3}{x^3}+\frac{3}{x^7}+\frac{1}{x^9}+\frac{1}{x^{12}}\right)+$$
$$+2^{17}\cdot 2^3\cdot 2^1\cdot\left(\frac{1}{x^2}+\frac{5}{x^3}+\frac{3}{x^4}+\frac{3}{x^8}+\frac{1}{x^{10}}+\frac{1}{x^{13}}\right)+2^{23}\cdot 2^3\cdot 2^1\cdot$$
$$\cdot\left(\frac{1}{x^4}+\frac{5}{x^5}+\frac{3}{x^6}+\frac{3}{x^{10}}+\frac{1}{x^{13}}+\frac{1}{x^{15}}\right)+2^3\cdot 2^1\cdot\left(\frac{2}{x^1}+\frac{1}{x^{26}}+\frac{1}{x^{40}}+\frac{1}{x^{43}}\right)+$$
$$+2^{13}\cdot 2^1\cdot\left(\frac{2}{x^3}+\frac{1}{x^{27}}+\frac{1}{x^{41}}+\frac{1}{x^{44}}\right)+2^{17}\cdot 2^1\cdot\left(\frac{2}{x^4}+\frac{1}{x^{28}}+\frac{1}{x^{42}}+\frac{1}{x^{45}}\right)+$$
$$+2^{23}\cdot\left(\frac{2}{x^6}+\frac{1}{x^{30}}+\frac{1}{x^{44}}+\frac{1}{x^{47}}\right)+\frac{32}{x^1}+\frac{32}{x^3}+\frac{32}{x^4}+\frac{32}{x^7}+\frac{5}{x^6}+\frac{5}{x^9}+\frac{5}{x^{10}}+\frac{5}{x^{13}}=1$$

Его решение X_0 равно $1.322\cdot 10^5$, $C(I)=\log 1.322\cdot 10^5=17.012$.

Полученные $C(I)$ ни как не учитывают частоту работы процессора, а это не верно, так как могут быть модели процессоров, у которых наборы команд и время их выполнения идентичны и разницу в производительности определяет как раз частота процессора.

Поэтому помножим полученные нами оценки на частоты соответствующих процессоров:

$$C_{i286}(I)=5.402*12.5\text{ МГц}=67.52$$
$$C_{i386}(I)=7.512*20.0\text{ МГц}=150.24$$
$$C_{i486}(I)=17.012*66.0\text{ МГц}=1123.00$$

Такой скачек вычислительной способности последнего компьютера обусловлен наличием у него двух уровневой кэш памяти и пяти ступенчатого конвейера, а так же более высокой частотой процессора.

В документации Intel к процессору 80386 [5] приводятся данные, что увеличение производительности относительно Intel 80286 составило 2-3 раза. Полученные оценки вычислительных способностей Intel 80286 и Intel 80386 согласуются с этими данными. В документации к процессору Intel 80486 [6] упоминается скачек производительности по отношению к предшествующим моделям в 5-10 раз, что тоже соответствует полученным нами результатам. Разброс эмпирических данных предоставляемых Intel велик, потому что компания выпускала сразу полные и урезанные модели (так называемые бюджетные) одной и той же серии процессоров, но данные о производительности предоставляла по всей серии процессоров сразу.

3.2 Влияние кэш памяти на вычислительную способность процессора

Выше было упомянуто влияние быстрой кэш памяти на производительность процессора. Так процессор Intel 80486 имеющий два уровня кэш памяти оказался на много производительнее своих предшественников. Представляет интерес вопрос, а как сильно влияет кэш память на производительность?

С помощью используемой нами модели можно оценить это влияние. Для начала исключим из уравнения для Intel 80486 слагаемые, отвечающие за кэш память первого уровня расположенную на кристалле процессора. Ниже приведено уравнение без этих слагаемые:

$$\frac{1}{x^1}+\frac{5}{x^2}+\frac{7}{x^3}+\frac{2}{x^4}+\frac{2}{x^5}+\frac{1}{x^7}+\frac{1}{x^{12}}+\frac{1}{x^{14}}+\frac{1}{x^{15}}+\frac{1}{x^{17}}+2^3\cdot 2^3\cdot 2^2\cdot$$
$$\cdot\left(\frac{4}{x^1}+\frac{1}{x^3}+\frac{6}{x^6}+\frac{1}{x^8}+\frac{1}{x^9}+\frac{1}{x^{11}}\right)+2^{17}\cdot 2^3\cdot 2^1\cdot\left(\frac{1}{x^2}+\frac{5}{x^3}+\frac{3}{x^4}+\frac{3}{x^8}+\frac{1}{x^{10}}+\frac{1}{x^{13}}\right)+$$
$$+2^{23}\cdot 2^3\cdot 2^1\cdot\left(\frac{1}{x^4}+\frac{5}{x^5}+\frac{3}{x^6}+\frac{3}{x^{10}}+\frac{1}{x^{13}}+\frac{1}{x^{15}}\right)+2^3\cdot 2^1\cdot\left(\frac{2}{x^1}+\frac{1}{x^{26}}+\frac{1}{x^{40}}+\frac{1}{x^{43}}\right)+$$
$$+2^{17}\cdot 2^1\cdot\left(\frac{2}{x^4}+\frac{1}{x^{28}}+\frac{1}{x^{42}}+\frac{1}{x^{45}}\right)+2^{23}\cdot\left(\frac{2}{x^6}+\frac{1}{x^{30}}+\frac{1}{x^{44}}+\frac{1}{x^{47}}\right)+$$
$$+\frac{32}{x^1}+\frac{32}{x^3}+\frac{32}{x^4}+\frac{32}{x^7}+\frac{5}{x^6}+\frac{5}{x^9}+\frac{5}{x^{10}}+\frac{5}{x^{13}}=1$$

Его решение X_0 равно $2.093\cdot 10^3$, $C(I)=\log 2.093\cdot 10^3=11.032$.

Умножать на частоту процессора полученное значение не будем, так как сравнивается один и тот же процессор. Как видно без маленькой, но очень быстрой памяти расположенной на кристалле процессора производительность значительно упала. Теперь уберем более объемную, но и более медленную кэш память второго уровня расположенную на материнской плате, стоит отметить, что она не значительно быстрее оперативной памяти. Уравнение без кэш памяти первого и второго уровня:

$$\frac{1}{x^1}+\frac{5}{x^2}+\frac{7}{x^3}+\frac{2}{x^4}+\frac{2}{x^5}+\frac{1}{x^7}+\frac{1}{x^{12}}+\frac{1}{x^{14}}+\frac{1}{x^{15}}+\frac{1}{x^{17}}+2^3\cdot 2^3\cdot 2^2\cdot$$
$$\cdot\left(\frac{4}{x^1}+\frac{1}{x^3}+\frac{6}{x^6}+\frac{1}{x^8}+\frac{1}{x^9}+\frac{1}{x^{11}}\right)+2^{23}\cdot 2^3\cdot 2^1\cdot\left(\frac{1}{x^4}+\frac{5}{x^5}+\frac{3}{x^6}+\frac{3}{x^{10}}+\frac{1}{x^{13}}+\frac{1}{x^{15}}\right)+$$
$$+2^3\cdot 2^1\cdot\left(\frac{2}{x^1}+\frac{1}{x^{26}}+\frac{1}{x^{40}}+\frac{1}{x^{43}}\right)+2^{23}\cdot\left(\frac{2}{x^6}+\frac{1}{x^{30}}+\frac{1}{x^{44}}+\frac{1}{x^{47}}\right)+$$
$$+\frac{32}{x^1}+\frac{32}{x^3}+\frac{32}{x^4}+\frac{32}{x^7}+\frac{5}{x^6}+\frac{5}{x^9}+\frac{5}{x^{10}}+\frac{5}{x^{13}}=1$$

Его решение X_0 равно $1.089\cdot 10^3$, $C(I)=\log 1.089\cdot 10^3=10.089$.

Падение вычислительной способности произошло, но оно не так существенно, как в первом случае. Теперь можно сделать вывод, что главную роль играет быстрая кэш память первого уровня, кэш второго уровня тоже дает прирост производительности, но не такой существенный.

4. Анализ результатов

Была рассчитана вычислительная способность трех компьютеров на процессорах Intel 80286, Intel 80386 и Intel 80486. Полученные результаты подтверждаются приводимыми данными компании Intel о производительности этих процессоров.

Так же было проанализировано влияние кэш памяти на производительность компьютера, полученные результаты совпадают с нынешними представлениями о кэш памяти [7].

Из выше перечисленного можно заключить, что модель, предложенная в работе [1], на практике работает. Требуется провести исследования на более современных компьютерах с более точным описанием эмпирических результатов, а так же пробовать оценить вычислительную способность многоядерных систем.

Литература

[1]. Boris Ryabko, Using Information Theory to Study Efficiency and Capacity of Computers and Similar Devices // Information 2010, 1, P. 3-12;

[2]. C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," Bell Sys. Tech. J. , vol. 27, pp. 379-423, pp. 623-656, 1948;

[3]. Intel x86 Quick Reference Instruction Manual - 8086/80186/80286/80386/80486, 1995;

[4]. Касперски К., Секреты поваров компьютерной кухни или ПК: решение проблем, BHV, 2003.

[5]. Intel 80386 Programmer's Reference Manual, 1986;

[6]. Intel 80486 Programmer's Reference Manual, 1993.

[7] A.S.Tanenbaum, Structured computer organization, Prentice Hall PTR, 2005.