

INSIDE: Сопроцессоры Intel Xeon Phi для HPC

с. 18-21

Стратегическая цель

ПИОНЕР СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ ЭРЫ

Победы Виктора Михайловича Глушкова

с. 24

www.supercomputers.ru

4 (12) зима 2012

СУПЕР КОМПЬЮТЕРЫ



с. 10

Что там, в кроличьей норе?

Пространственное течение в центробежных компрессорах

с. 54

с. 44

Кибернетика и перспективы развития СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ



Кибернетика и перспективы развития суперкомпьютеров

Текст О. Н. Граничин

Иллюстрация О. Пащенко

Книга Норберта Винера 1947 года возвестила о становлении новой науки КИБЕРНЕТИКИ, в которой информационно-управленческая связь в явлениях материального мира выступает как фундаментальное его свойство.

В. Н. Фомин, 1984

Олимпийские спортивные призывы: «Быстрее, Выше, Сильнее» в компьютерной области трансформировались в лозунг: «Быстрее, Мощнее, Миниатюрнее». На самом деле эти противоречивые цели стыкуются в одном: технологии приближаются к созданию «мобильного» искусственного интеллекта – уже скоро умные встроенные вычислительные устройства смогут выполнять те функции, которые несколько лет назад и не снились пользователям компьютеров. Такие системы немислимы без современных методов распараллеливания вычислений, а их моделирование и работа в кооперации – без мощных суперкомпьютеров, роль и место которых в обществе преобразятся.

Кибернетическая революция

В истории развития цивилизации произошло несколько *информационных революций* – преобразований общественных отношений из-за кардинальных изменений в сферах обработки информации и информационных технологий. Следствием подобных преобразований всякий раз являлось приобретение человеческим сообществом нового качества (рис. 1).

Ранее ключевым ресурсом был капитал, сейчас – знания/информация. Товары и услуги доставлялись транспортом по дорогам, сейчас на передовые позиции выходят цифровые сети (рис. 2).

Ранее фокус был на региональной сфере, сейчас – на глобальной. Раньше факторами успеха были экономии при масштабировании, теперь – АДАПТИВНОСТЬ, то есть способность быстрого ответа на непредсказуемые изменения.

При этом за последние полвека стоимость применения цифровых технологий снизилась чрезвычайно сильно, в отличие от роста затрат на труд и на использование традиционных механических технологий (рис. 3). Эти изменения ведут к нарастанию степени сложности явлений в экономике и обществе. Живущие и работающие в сложных условиях частых непредсказуемых разрушительных событий хорошо структурированные общества и бизнесы не могут быстро реагировать на непредвиденные события. Неопределенности генерируют тревогу, но неопределенности дают и возможности решения проблем. Критическими факторами при принятии решений в режиме реального времени являются скорость – надо принять и реализовать решение до наступления следующего «разрушительного» события – и интеллект (природный и/или искусственный) – надо достичь цели в условиях неопределенности. В этих условиях критической технологией становится мультиагентная техно-

логия для поддержки (или замены) процесса принятия решения человеком. Требуется осознание возможности (и необходимости) эффективного соединения технологий мультиагентных, которые легко и естественно распараллеливаются, и суперкомпьютерных – для реализации мощного искусственного интеллекта.

У людей всегда был интерес к искусственному интеллекту. В конце XX века выделено два основных подхода к моделированию искусственного интеллекта (*Artificial Intelligence* – AI): машинный интеллект, заключающийся в строгом задании результата функционирования, и искусственный разум, основанный на моделировании внутренней структуры автоматизированной системы, соответствующей строению человеческого мозга.

Но сейчас от теорий человечество делает серьезный шаг к новой реальности: кибернетическому будущему. По многим признакам мы вступили в новую фазу *кибернетической революции*.

Понять суть происходящих изменений нельзя без переосмысления многих аспектов парадигмы «Что такое вычислительное устройство и что такое вычислительный процесс» (см.: Суперкомпьютеры, № 2 (6), 2011, с. 8–14). Для начала разберемся в таких кажущихся общепринятыми и понятными терминах, как «информация», «сигналы», «данные», «знания» и «управление».

1.1. Информация, сигналы, данные, знания и управление

В XX веке слово «информация» стало



Рис. 1. Последовательность революций XIX–XXI вв.

термином во множестве научных областей, получив в каждой из них особые определения и толкования. Что означает термин *информация*? Обычно мы рассматриваем информацию как сообщение о том, что что-то произошло, т. е. одна из важнейших ее черт – изменение чего-то (объекта информации). Но информация возникает у кого-то или в чем-то (субъект информации).

Ценность информации определяется ее способностью «подтолкнуть» субъекта к определенным действиям, т. е. его способностью на основании полученной информации сформулировать некоторое управляющее воздействие (см. примеры в табл. 1).

На самом деле два крайних термина в заголовке этого раздела неразрывно друг с другом связаны и не могут друг без друга существовать (как двуликий Янус или Инь и Янь в китайской философии). Информация, «не подталкивающая» к действию, бессмысленна, так же как и бессмысленны какие-то действия без лежащей в их основе информации.

Норберт Винер более шестидесяти лет тому назад провозгласил начало эры новой науки *кибернетики*, одним из первых четко подметив, что «информационно-управленческая связь – это существенная часть любых явлений в живой и неживой природе».

Введем для информации обозначение *x*, а для управления – *u*. Процесс принятия управленческого

решения формализованно может быть записан так:

$$U = U(x),$$

где $U(\cdot)$ – некоторая функция от x . Часто информацию x отождествляют с вектором состояний исследуемой системы. В этом случае говорят о задании обратной связи по состоянию.

Реализация управления естественно влияет на информацию, способствуя новым изменениям объекта информации. Сформированное управление u поступает в систему и воздействует на состояние x , во многих случаях изменяя его. Связь между информацией и управлением можно представить в виде схемы (рис. 4).

Понимание неразрывной связи информации и управления снимает актуальность споров о первичности бытия или сознания, поиска ответа на вопрос: что раньше – слово или дело?

Формализация процесса принятия решений приводит к необходимости определения понятий «сигналы», «данные» и «знания». Информация проявляет себя через изменения в тех или иных физических или социальных явлениях. Например, у заболевшего человека повышается температура тела. При падении дерева органы слуха фиксируют изменения в окружающих нас звуках, а глаза – изменения в отображаемой картинке. При

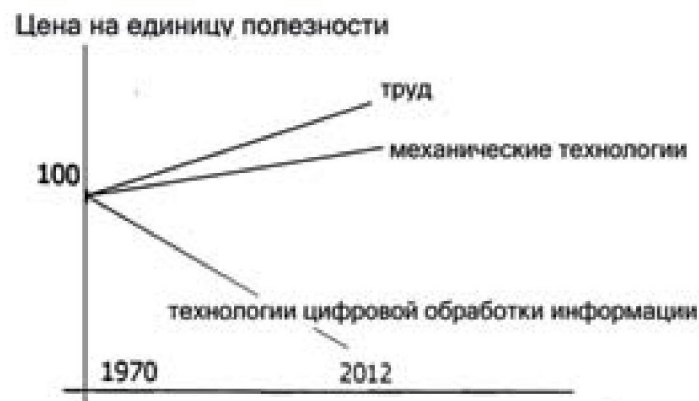


Рис. 3. Сравнение стоимости цифровых технологий с механическими



Рис. 2. Сдвиги в технологиях XXI в.

движении подводной лодки от ее гребных винтов распространяются специфические акустические волны. При приближении самолета и попадании его в зону видимости нашего радара от него отражается посылаемая радаром электромагнитная волна. Социальные изменения проявляются через выборочные опросы, голосования и т. п. Физические и социальные явления и процессы, изменение которых можно зарегистрировать с помощью органов чувств или приборов, называются сигналами. Результаты регистрации называются данными. Обозначим сигналы – f , а данные – y . Схема процесса регистрации сигнала показана на рис. 5. Если нам доступны только данные наблюдений, то процесс принятия решения – это выработка управляющего воздействия на основе зарегистрированных данных:

$$U = U(y).$$

Законы управления такого типа называются обратными связями по наблюдениям.

Мы оставляем открытым вопрос о том, как выбирать функцию обратной связи. В классической теории управления вводятся понятия наблюдаемости и управляемости, соответствующие возможности восстановить состояние объекта по наблюдениям или перевести объект в произвольное заданное состояние. Здесь мы не будем детально останавливаться на этих вопросах. Осознание связей между зарегистрированными данными и информацией, а также способы выбора управляющих воздействий в зависимости от той или иной информации будем называть знаниями.

Например, регистрация температуры тела человека дала значение более 38,5 градусов Цельсия. Это говорит о том, что человек болен. А информация о разливе Нила в определенный день по лунному календарю дала возможность создать первую крупную цивилизацию в Египте, позволив прогнозировать этот процесс и организовать посевы риса в строго определенное время.

В работоспособных системах имеющиеся знания позволяют на основании получаемых данных у формировать управляющие воздействия u , которые или дают какой-то выигрыш, или позволяют как-то скомпенсировать негативную информацию. Без базы знаний постановка задачи о выработке

обоснованных управляющих воздействий оказывается почти бессмысленной. Уточнение «почти» дано потому, что при априорном отсутствии знаний их зачастую можно приобрести с течением времени. Совокупность накопленных знаний называют онтологией.

Знания в онтологию как поступают извне в виде постулируемых законов («откровений»), так и формируются внутри системы при обработке данных. Процесс извлечения знаний из данных определяет круг задач такой новой бурно развивающейся области, как *Data Mining*.

В контексте задач управления онтология служит своеобразной базой данных (знаний), из которой выбирается наиболее адекватная текущей ситуации функция управления $U(\cdot)$ (см. рис. 6).

Изменение набора знаний со временем – очень важная черта, позволяющая адаптироваться к изменяющимся условиям.

Реакция на информацию (управляющее воздействие) может быть ранее определена извне в соответствии с некоторыми правилами (законами), записанными в онтологии, либо формироваться изнутри, адаптируясь к изменениям (т. е. пытаюсь найти лучшее решение для поведения в изменившейся ситуации).

Процессы управления и накопления знаний часто являются взаимно противоречивыми. Целью управления обычно является достижение какого-то устойчивого состояния (по возможности не изменяющегося со временем). В этом состоянии «очень мало информации», и, следовательно, невозможно выявить или установить новые связи, значения и т. п. Например, о лежащем в пыли на обочине дороги камне мало что можно узнать при поверхностном осмотре, его неизменность дает мало информации (характеристик изменений). Камень надо перевернуть, поднять, толкнуть или расколоть для получения какой-то информации. Это приводит к тому, что при синтезе законов управления часто

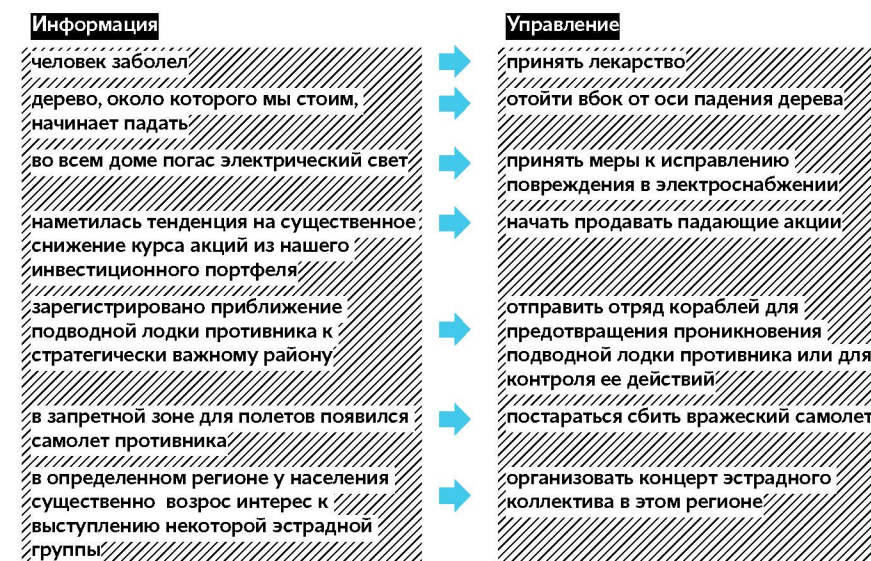


Таблица 1. Примеры связи информации и управления

сталкиваются с проблемой недостаточной вариативности последовательности наблюдений. А. А. Фельдбаум сформулировал известный принцип «дуального управления»: управляющие воздействия должны быть в известной мере изучающими, но в известной мере направляющими. Например, если цель адаптивного управления состоит в минимизации отклонения вектора состояния системы от заданной траектории, то это часто приводит к вырожденной последовательности наблюдений, в то время как для успешного проведения идентификации неизвестных параметров системы должно быть обеспечено «разнообразие» наблюдений.

На практике реальная ситуация осложняется еще и тем, что при получении данных в любом регистра-

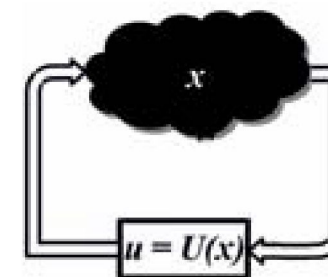


Рис. 4. Информация и управление

ционном устройстве к сигналам добавляются некоторые помехи (ошибки) v (см. рис. 7). Структурная схема системы с обратной связью при наблюдениях с помехами приведена на рис. 8. Хорошо поставленный эксперимент при тщательном измерении позволяет в некоторых случаях свести ошибки v к минимуму $v \approx 0$. Если первоначально «чистый» эксперимент не поставить, то стараются сделать его таковым с течением времени, т. е. $v \rightarrow 0$. В других случаях в задачах о наблюдении физических явлений часто достаточно обоснованно предполагают статистическую природу помех, но возможны осмысленные постановки задачи и при произвольных внешних помехах (см. Суперкомпьютеры, № 4 (8), 2011, с. 41–43).

На фундаментальность понятия «информация» указывал еще основоположник кибернетики Норберт Винер. Феномен информации оказался настолько неоднозначным, что по праву считается одной из сложнейших проблем современности. Уже сами попытки подобраться к

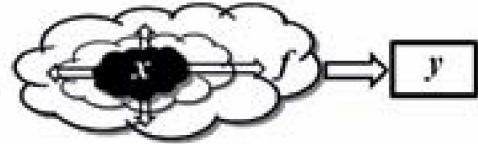


Рис. 5. Схема регистрации сигнала (получения данных)

понятию информации, различные его трактовки в трудах ученых и практиков заставляют задуматься о необычной роли информации в жизни развивающихся систем. Информация – не просто результат отражения, не просто данные или знание. Только взаимодействуя с потребителем, данные или знание приобретают характер сообщения, сведения, т. е. становятся информа-

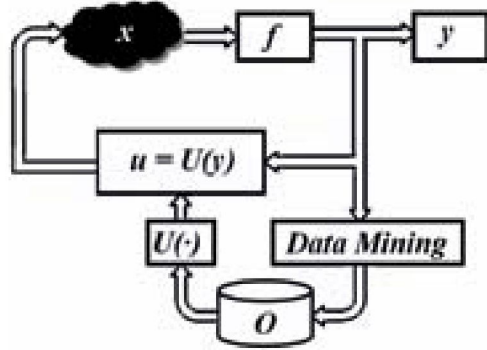


Рис. 6. Выбор функции управления U(.)

цией. Информация – это данные, находящиеся в постоянном обороте и движении, это знания, которые собираются, хранятся, перерабатываются, передаются и используются развивающейся системой. Знание только тогда приобретает качество информации, когда оно действует или может действовать как основа регуляции, управления. Информация есть только там, где есть движение, преобразование, использование и управление.

Соединение процессов обработки данных и управления

Сложившаяся к настоящему времени парадигма использования

суперкомпьютеров базируется на исторически сложившемся разделении процессов обработки данных и принятия управленческих решений (после обработки). Основания этого разделения прослеживаются в истории развития средств вычислительной техники. Первоначально компьютеров было мало и они, занимая огромные пространства, требовали специальных условий для эксплуатации. Формировались особые вычислительные центры для объединенного решения в одном месте множества разных задач. Встроенным устройствам традиционно отводилась роль или устройств для сбора данных, или устройств для реализации определенных управляющих воздействий. В некоторых случаях они использовались как регуляторы в простых контурах обратной связи. Суперкомпьютеры брали на себя выполнение задач Data Mining.

Но надо четко отдавать себе отчет в границах применимости этой традиционной парадигмы. В природе и обществе информационно-управленческие связи все-таки являются основой всех явлений и процессов. Искусственно разделяя процессы обработки данных и управления, мы существенно снижаем наши потенциальные возможности использования информационно-коммуникационных технологий. Надо ли разделять процесс обработки данных и процесс управления? С начала XXI века в теории управления заметен всплеск интереса

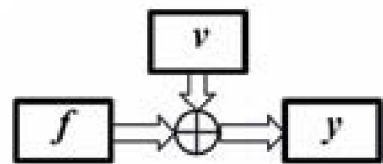


Рис. 7. Наблюдения с помехами

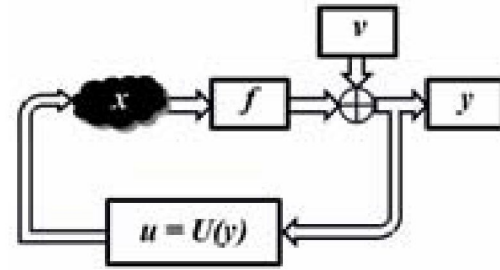


Рис. 8. Обратная связь по наблюдениям с помехами

к тематике управления в сетях, коллективному взаимодействию, мультиагентным технологиям и т. п. Это во многом связано с технологическим прогрессом. Новые альтернативы позволяют по-новому взглянуть на ставшую уже традиционной область Data Mining, для решения задач которой в основном используется время суперкомпьютерных центров.

В литературе все чаще появляются мысли о возрождении науки Кибернетики (с большой буквы), Б. В. Соколов и Р. М. Юсупов пишут о появлении «неокибернетики», Б. Р. Андриевский, А. С. Матвеев и А. Л. Фрадков считают, что теория управления, начавшись с регуляторов механических систем в XIX в., пройдя к концу XX в. этап глубокой интеграции с цифровыми технологиями обработки данных и принятия решений, фокусируясь в XXI в. на сетях объектов, выступает «собираателем» трех основных компонент прогресса второй половины XX в.:

- теории управления (Control Theory);
- теории коммуникаций (Communication Theory);
- информатики (Computer Science).

Может ли дать какое-то новое качество в обработке данных и извлечении знаний применение кибернетической парадигмы, при которой процессы «добычи знаний» и получения информации будут учитывать неразрывную связь информации и управления (и опираться на нее)? Да, может!

Для иллюстрации положительного ответа можно привести два примера повышения эффективности процессов обработки данных и управления при изменении парадигмы: рандомизация управляющих воздействий при решении задач оценивания неизвестных параметров системы при наблюдениях с произвольными внешними помехами и использование замкнутых стратегий управления в условиях неопределенностей.

Первый пример детально разобран в предыдущей статье (Суперкомпьютеры, № 4 (8), 2011, с. 41–43). Второй пример – использование метода динамического программирования Беллмана при формировании стратегии управления в условиях неопределенностей является хорошей иллюстрацией качества традиционных решений большого класса задач, обрабатываемых сейчас с помощью суперкомпьютеров из-за серьезных вычислительных сложностей.

Эффективность замкнутых стратегий в условиях неопределенностей. Рассмотрим объект управления (ОУ) с входами $u(t)$ и выходами $y(t)$, и предположим, что задано начальное состояние $y(0) = 1$, и динамика объекта при $t = 1, 2$ описывается уравнением

$$y(t) + a y(t - 1) = u(t - 1) + v(t)$$

с неопределенностями $v(t)$ и a двух типов:

- динамические возмущения $v(t)$ неизвестны и ограничены для всех t : $|v(t)| \leq 1$, но могут меняться со временем;
 - коэффициент модели a также неизвестен и ограничен: $a \in [1; 5]$, но он не может изменяться со временем.
- Мы можем выбирать входы $u(0)$ и $u(1)$. Пусть наша цель – минимизировать $|y(2)|$. Рассмотрим минимаксный функционал качества:

$$J = \sup_{a \in [1; 5]} \sup_{|v(t)| \leq 1} |y(2)| \rightarrow \min_{u(0), u(1)}$$

Конечно, это пример не для супервычислений. Мы специаль-

но выбрали достаточно простую модель и рассматриваем всего два шага по времени $t = 1, 2$, с тем чтобы решить задачу почти устно. Но если рассмотреть $t = 1, 2, 3$, то сложность серьезно возрастает, а при больших t несколько лет тому назад одному из моих дипломников не хватило времени для решения задачи не только на персональном компьютере, но и с привлечением дополнительных вычислительных ресурсов нашего университета.

Мы сравним качество минимаксной оптимизации для двух классов допустимых стратегий управления:

- программное управление,
- замкнутое управление.

Программное управление. Этот класс состоит из всевозможных пар $(u(0), u(1))$. Для того чтобы выбрать $u(0)$ и $u(1)$, перепишем функционал качества в соответствии с уравнением ОУ как функцию от $a, v(1), v(2), u(0), u(1)$:

$$J = \sup_{a \in [1; 5]} \sup_{|v(t)| \leq 1} |a^2 - au(0) + au(1) + u(1) + v(2)|.$$

Произведя максимизацию по отношению к $a, v(1)$ и $v(2)$, получаем функцию от переменных $u(0)$ и $u(1)$. Минимизация этой функции по $u(0)$ и $u(1)$ дает значения $u(0) = 7$, $u(1) = 12,25$ и

$$J_{\text{пр}}^{\text{opt}} = 8,25.$$

Замкнутое управление. В момент времени $t = 1$ мы получаем выход $y(1)$ и знаем предыдущее управление $u(0)$. Замкнутые стратегии управления определяются парой $u(0)$ и функцией обратной связи. При фиксированном входе $y(1)$ и управлении $u(0)$ в силу уравнения ОУ и условия $|v(1)| \leq 1$ выполняется следующее неравенство:

$$|y(1) + a - u(0)| \leq 1.$$

Следовательно, можно определить интервал

$$[a^-, a^+] = [1; 5] \cap [-1 + u(0) - y(1); 1 + u(0) - y(1)],$$

который гарантированно содержит параметр a , и его границы вычисляются по формулам

$$a^- = \max\{1, -1 + u(0) - y(1)\};$$

$$a^+ = \min\{1 + u(0) - y(1); 5\}.$$

Для оптимального выбора $u(1)$ функционал качества можно переписать как функцию от $a, y(1), v(2), u(1)$:

$$J = \sup_{a \in [1; 5]} \sup_{|v(t)| \leq 1} (\sup_{a \in [a^-, a^+]} \sup_{|v(2)| \leq 1} | -ay(1) + u(1) + v(2) |).$$

Минимизация по $u(1)$ приводит к формуле

$$u(1) = U_1(y(1), u(0)) = y(1)(a^- + a^+)/2,$$

учитывая которую, получаем

$$J = \sup_{a \in [1; 5]} \sup_{|v(t)| \leq 1} |y(1)(a^- + a^+)/2 + v(2)|.$$

После исключения $y(1)$ в силу уравнения ОУ, произведя операции максимизации, мы можем переписать J как функцию от $u(0)$. Минимизация по $u(0)$ дает значение $u(0) = -3$ и

$$J_{\text{зам}}^{\text{opt}} = 2,125.$$

В итоге имеем

$$J_{\text{зам}}^{\text{opt}} = 2,125 \ll J_{\text{пр}}^{\text{opt}} = 8,25.$$

Зависимость качества управления от задания класса неупреждающих стратегий осознана сравнительно недавно. Если все параметры объекта управления известны и помехи отсутствуют, то множества программных и замкнутых стратегий управления оказываются совпадающими.