

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 621.391.6

© М. М. Нестеров, В. Н. Трифанов

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ СИГНАЛОВ ВОЛНОВОЙ ПРИРОДЫ

Дается характеристика сигналов волновой природы по энергии, импульсу и информации. Исследуются принципы Ферма и Мопертюи в применении ко времени и действию сигнала, а также к его информации. Анализируются групповая и фазовая скорости распространения сигнала. Даются оценки ограничений по действию, скорости, управляемости и устойчивости процессов обработки сигнала.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ

В процессах приема, обнаружения, обработки и интерпретации сигналов действует ряд фундаментальных ограничений, накладывающих определенные пределы. Частично эти ограничения были рассмотрены авторами в работе [1]. Здесь будет выполнен более обстоятельный анализ проблемы.

Сигнал волновой природы характеризуется рядом параметров, к которым прежде всего относятся параметры времени, энергии, пространства, импульса, скорости, действия и информации. Каждая группа имеет свои минимальные и максимальные пределы. Фундаментальные принципы и законы физики и информатики позволяют некоторые пределы количественно оценить, другие только качественно обозначить, а остальные остаются неопределенными на уровне современных знаний. Рассмотрим некоторые из фундаментальных ограничений.

ПРЕДЕЛ РАЗНООБРАЗИЯ

При решении проблемы интерпретации сигнала требуется решать задачи классификации сигналов, их диагностики и распознавания. В этой связи приходится совершать множество элементарных актов действия. В физике действие за время T определяется произведением энергии E на это время, а элементарное действие равно постоянной Планка $\hbar$. Тогда разнообразие выполненных действий определится выражением

$$2^N = ET / \hbar. \quad (1)$$

Здесь N — количество объектов классификации, 2^N — количество классификационных последовательностей без повторений по одному, по два и т.д., по N .

Пусть, к примеру, элементарное действие совершается переносом одного электрона в потенци-

альном поле с разностью потенциалов $u = 10$ В и пусть запас электронов равен числу Авогадро N_a . Тогда разнообразие действий будет равно

$$2^N = eN_a u / \hbar = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} / (6.63 \cdot 10^{-34}),$$

$$2^N = 1.45 \cdot 10^{38} = 2^{127}.$$

Здесь число классифицируемых объектов равно $N = 127$, а разнообразие классификационных последовательностей равно 2^{127} .

Это не так уж много, более того, это очень мало. Суть заключается в том, что малое количество объектов порождает большое количество их последовательностей. Каждая такая последовательность есть выборка из множества этих объектов и является некоторой семантической или лексикографической фразой. Много фраз — много действий над малым числом объектов. Каждый объект можно рассматривать как единицу данных. Следовательно, при большом количестве действий совершается работа над малым количеством данных. В действительности объем данных может быть намного больше этого числа. В этом и заключается основное противоречие между объемом действий и объемом данных. Предел разнообразия называют иногда пределом Браммермана.

ПРЕДЕЛ ЧАСТОТЫ ДЕЙСТВИЙ

Формулу (1) можно написать в другом виде

$$E = 2^N \hbar f, \quad f = 1/T,$$

где f — частота действий. Из формулы видно, что с ростом частоты действий f растет энергоемкость всей совокупности действий. Энергетический порог ограничивает частоту действий сверху. Энергетический предел ограничивает быстродействие современных цифровых вычислительных устройств, включая и супер-ЭВМ.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Основными экстремальными принципами в физике являются принцип наименьшего времени Ферма и принцип наименьшего действия Мопертюи.

Рассмотрим последовательно эти принципы для сигналов волновой природы.

Выше уже отмечалось, что сигнал несет в себе энергию, импульс и информацию. Экстремальные принципы физики относятся к энергии сигнала.

Принцип Ферма в энергетических средах

Принцип наименьшего времени Ферма формулируется так:

из всех возможных движений сигнала реально реализуется то, время исполнения которого минимально.

Ферма сформулировал свой принцип для движения света. Здесь дается более широкая трактовка. Время движения сигнала или время его действия в выделенной области складывается из времени его трансляции и времени его восприятия в процессе возбуждения приемника или локальной области передающей среды.

Время трансляции определяется временем реализации действия сигнала, а время восприятия — мощностью процессов возбуждения.

Таким образом, все время движения сигнала в локальной области управляется двумя инвариантами: действием J_e и мощностью D_e

$$\tau_e = J_e / E + E / D_e = \tau_t + \tau_v, \\ \tau_t = J_e / E, \quad \tau_v = E / D_e.$$

Здесь τ_e, τ_t, τ_v — время действия сигнала в локальной области, время его трансляции и возбуждения, E — энергия сигнала.

Беря производную от времени движения сигнала по энергии и приравнивая результат нулю, получаем:

$$E^2 = J_e D_e, \quad \tau_t = \tau_v = \tau = \sqrt{J_e / D_e}, \\ \tau_e = \tau_t + \tau_v = 2\tau = 2\sqrt{J_e / D_e}, \quad (2) \\ \tau^2 = J_e / D_e.$$

Принцип Мопертюи в энергетических средах

Сформулируем другой экстремальный принцип, а именно принцип наименьшего действия Мопертюи:

из всех возможных движений сигнала в локальной области реально реализуется то, в котором действие наименьшее.

Действие энергии, или просто действие, есть интеграл от энергии по времени движения в локальной области. Для его определения необходимо

знать выражение для энергии. В физике, как правило, энергия равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_k + E_n = mv^2 / 2 + E_n, \quad v = dR / dt.$$

Здесь E, E_k, E_n — полная, кинетическая и потенциальная энергии; m — масса возбуждения (фонона); v — скорость движения сигнала (фонона); t — время; dR — локальный путь движения сигнала (масштаб фонона).

Полагая область движения малой, в пределах масштаба фонона, имеем и малое время движения $dt = \tau$ в пределах этого масштаба. С учетом этого предположения энергия сигнала примет вид:

$$E = m dR^2 / (2\tau^2) + E_n. \quad (3)$$

Выражение подобного типа рассматривалось в работах [6, 7].

В работе [6] Э.В. Шуряк, изучая квантовую хромодинамику, разбивал траекторию движения частицы на элементарные отрезки и суммировал оператор энергии частицы в мнимом времени по участкам траектории:

$$E = \sum_k (m dR_k^2 / (2\tau^2) + E_{nk},$$

где dR_k, E_{nk}, τ — отрезок k -го участка траектории, его потенциальная энергия и время движения по нему; m — масса частицы.

В другой работе [7] А.А. Матышев, разрабатывая теорию изотраекторного корпускулярного движения, выразил полную энергию в виде:

$$E = mR^2 / (2t^2) + E_n(R).$$

Здесь $R, E_n(R)$ — путь, пройденный частицей по изотраектории за время t , и потенциальная энергия как функция пройденного пути.

Возвращаясь к формуле полной энергии сигнала (3), обратим внимание, что выражение

$$J = m dR^2$$

характеризует момент инерции возбуждения сигнала (фонона). С учетом этого замечания полная энергия фонона принимает вид:

$$E = J / (2\tau^2) + E_n.$$

Зная энергию фонона, можно определить его действие:

$$J_t = E\tau = J_k + J_n = J / (2\tau) + E_n \tau,$$

$$J_k = J / (2\tau), \quad J_n = E_n \tau,$$

где J_t, J_k, J_n — действие сигнала и его кинетическая (трансляционная) и потенциальная части.

Кинетическая часть J_k характеризует действие

трансляции сигнала в локальной области, а потенциальная часть J_n определяет действие возбуждения (восприятия) его на приемник или среду.

Дифференцируя действие фонона по времени и приравнявая результаты нулю, находим:

$$\begin{aligned}\tau^2 &= J/(2E_n), \quad J_k = \sqrt{JE_n}/2, \\ J_e &= 2J_n = \sqrt{2JE_n}, \\ E_k &= E_n, \quad E = 2E_n = 2E_k.\end{aligned}\quad (4)$$

Вернемся к принципу Ферма и результатам его действия, зная энергию фонона в виде

$$E = J/(2\tau^2) + E_n.$$

Выше были определены два инварианта: действия J_e и мощности D_e :

$$\begin{aligned}J_e &= E\tau = J/(2\tau) + E_n\tau, \\ D_e &= -dE/d\tau = J/\tau^3.\end{aligned}$$

По формуле из (2) имеем

$$\tau^2 = J_e/D_e = (J/(2\tau) + E_n\tau)\tau^3/J.$$

Решая это уравнения относительно τ , находим

$$\tau^2 = J/(2E_n) = J/E.$$

Теперь имеем возможность найти инварианты:

$$\begin{aligned}J_e &= \sqrt{2JE_n}, \quad D_e = 2E_n\sqrt{2E_n/J}, \\ E^2 &= J_e D_e = 4E_n^2, \quad E = 2E_n.\end{aligned}\quad (5)$$

Сравнивая результаты действия принципов Ферма и Мопертюи, убеждаемся, что они одинаковы.

Таким образом, для фононов принципы наименьшего времени и наименьшего действия эквивалентны. Этот, в общем-то, очевидный результат требовал своего доказательства для фононов сигнала волновой природы.

О двойственной природе фононов

Рассмотрим некоторые следствия из полученных результатов. Минимальное действие фонона равно постоянной Планка $\hbar$, а минимальное время действия — его периоду:

$$J_e = \tau E = \hbar, \quad E = \hbar/\tau = \hbar f, \quad \tau f = 1.$$

Здесь E , $\hbar$, τ , f — энергия, действие, период и частота фонона.

Как видно из формул (4), кинетическая и потенциальная энергии фонона равны между собой, а полная энергия, равная их сумме, в два раза больше. Отсюда получаем:

$$E = 2E_k = mv^2 = \hbar f.$$

Как видим, классические выражения Эйнштейна для полной энергии частиц и вещества справедливы для фонона. Отсюда следует, что фонон сигнала имеет двойственную корпускулярно-волновую природу. В частности, это замечание справедливо и для радиодиапазона, т.е. для фононов радиоволны.

Если оптимальный режим, в котором кинетическая энергия фонона равна потенциальной, сохранять по всей траектории движения, то потенциальную энергию вдоль траектории следует формировать по закону изменения кинетической энергии:

$$\begin{aligned}E_k(t) &= J/(2t^2), \\ E_n(\tau) &= E_k(\tau) = J/(2\tau^2).\end{aligned}$$

Отсюда получается закон формирования потенциальной энергии:

$$E_n(t) = E_n(\tau)(\tau/t)^2. \quad (6)$$

Задачу такого плана поставил А.А. Матышев в своей работе [7] для формирования изотраекторных режимов движения частиц. Заметим, что закон изменения потенциальной энергии вдоль изотраектории (6) получен А.А. Матышевым другим способом.

Далее, из формул (4) для действия в масштабе фонона находим:

$$\begin{aligned}JE &= \hbar^2, \quad E = \hbar f, \quad f\tau = 1, \\ Jf &= \hbar, \quad Jf^2 = E.\end{aligned}$$

Полная энергия складывается из средней энергии $\bar{E}$ и энергии флуктуации среды

$$E = \bar{E} + \tilde{E}.$$

Следовательно, частота фонона тоже флуктуирует:

$$f = \bar{f} + \tilde{f}, \quad f^2 = \bar{f}^2 + \tilde{f}^2.$$

По средней частоте и средней энергии можно найти момент инерции фонона

$$J = \bar{E} / \bar{f}^2.$$

А по флуктуации частоты определить флуктуацию энергии среды

$$\tilde{E} = J \tilde{f}^2.$$

Это очень важный результат, имеющий множество приложений. Перечислим некоторые из них.

В потенциальном поле земли с ростом высоты h потенциальная энергия растет. Увеличивается и полная энергия по закону

$$\tilde{E} = 2gh.$$

Изменение энергии приводит к соответствующему изменению частоты:

$$\tilde{f}^2 = \tilde{E} / J = \tilde{f}^2 (\tilde{E} / E) = f^2 (2gh / E).$$

Образно говоря, с ростом высоты фотон "синее", а при движении к земле он "краснеет".

В частности, часы, работающие на частотном стандарте, идут по-разному на разных высотах. На больших высотах они идут быстрее, чем на поверхности земли. Получен важный результат для службы времени вообще и для космической навигации в частности.

По флуктуациям частоты можно обнаруживать и измерять флуктуации энергии среды, в частности энергию турбулентности и энергию следа движущихся объектов, даже если они при обычных средствах наблюдения не видны. Для реализации таких методов обнаружения требуются высокоточные измерители и стандарты частоты.

Флуктуации частоты фотона при его движении в вакууме также могут быть принципиально обнаружены при наличии измерительных средств на сверхточных стандартах частоты. В этом случае экспериментально может быть зафиксирован лэмбовский сдвиг частоты электрона в атоме водорода на нижней (основной) орбите, и тем самым может быть оценена флуктуация энергии вакуума.

С этих же позиций можно объяснить флуктуацию частоты лазерного луча при его движении в вакууме. Флуктуация энергии лазерного луча происходит за счет флуктуации энергии вакуума. Поэтому по флуктуационному спектру частот когерентного лазерного луча можно судить об энергетическом спектре вакуумных флуктуаций при их взаимодействии с фотонами лазерного пучка. В общем случае флуктуация частоты когерентного излучения отображает флуктуации энергии среды, по которой распространяются фотоны сигнала волновой природы, взаимодействующие с этой средой. Следовательно, принципиально можно измерить спектр флуктуации энергии среды, который приемники воспринимают в виде шума.

По зависимостям (4) и (5) можно получить выражения

$$E\lambda^2 = Jv^2, \quad E\lambda = J_e v, \quad (7)$$

где E , λ , J , J_e , v — энергия, длина волны, момент инерции, интегральный инвариант, скорость движения фотона.

Уравнения (7) справедливы, в частности, и для света. Долгое время скорость света в вакууме рассматривалась как мировая константа. Однако исследования конца 20 века показывают, что для фотонов существуют две характерные скорости: локальная (фазовая) и интегральная (групповая).

Как видно из формулы (7), эти скорости зависят от "горизонта памяти вселенной", ее причинно-следственной связи, характеризуемой интегральным инвариантом J_e . При короткой (локальной) и вселенской (глобальной) памяти этот инвариант может принимать разные значения. В связи с этим разные значения должна принимать и скорость распространения сигнала. Групповой инвариант, как правило, больше локального. Поэтому групповая скорость сигнала меньше локальной (фазовой) скорости. Таким образом, фазовые (локальные) скорости распространения сигнала могут быть выше принятой скорости света. Некоторые экспериментальные измерения фазовых скоростей, в частности для радиоантенн, подтверждают эти предположения [8].

Обсуждаемая проблема является принципиальной для технологий измерения расстояний до цели. В традиционных методах измерения это расстояние измеряется по разности времени хода сигнала несущей частоты от приемника до цели и обратно:

$$R = ct / 2,$$

где R , c , t — расстояние до цели, скорость распространения сигнала и время хода сигнала от приемника до цели и обратно. Все было бы хорошо, если бы скорость распространения сигнала была известной универсальной константой. Так это и принято в традиционных методах измерения дальности разными дальномерами. Однако в свете изложенных представлений эта скорость не является универсальной вселенской константой. Она зависит не только от специфических свойств неоднородной передающей среды, по которой распространяется сигнал, но и от значения интегрального инварианта, определяемого на этом расстоянии. Он сам является функцией дальности и изменяется в пределах от локального до глобального (мировая константа) значения. Поэтому в технологиях измерения дальности традиционными методами имеется принципиальный источник неопределенности измерений, ограничивающий их точность.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Несмотря на многозначность определений понятия информации и измерения ее семантического значения, информационная теория, техника и технология быстро развиваются со второй половины 20 века. Это стало возможным благодаря основополагающим работам Дж. фон Неймана, К. Шеннона, Н. Винера, Л. фон Берталанфи, А. Тьюринга, Э. Поста и др. Ими часто проводились некоторые параллели между энергией и информацией. Обе характеристики сигнала являются скалярными

функциями и, как правило, носят аддитивный характер, т.е. их отдельные компоненты можно суммировать. Обе имеют кинетические и потенциальные составляющие, характеризующие скорость движения и память. Обе обладают интегральным инвариантом (памятью) и дифференциальным инвариантом (мощностью). Этой аналогии уже достаточно, чтобы к информации так же, как к энергии, применить принципы Ферма и Мопертюи для получения основополагающих зависимостей.

Принцип Ферма в информационных средах

Принцип наименьшего времени Ферма для информации будет звучать так:

из всех возможных последовательностей обработки информации есть такая, время исполнения которой принимает наименьшее значение.

Ее и рекомендуется принимать в организации технологии обработки. Однако в отличие от энергии применение этого принципа к информации связано с неопределенностью. Дело в том, что физические сигналы сами выбирают путь наименьшего времени в режиме самоорганизации. Что касается информации, то здесь дело обстоит иначе. В природе информационные процессы выполняются, как правило, в режиме самоорганизации. Поэтому принцип наименьшего времени Ферма здесь работает так же хорошо, как и в случае энергии.

Однако человек организует информационный процесс по своей воле, как правило декларативно. Самоорганизующаяся система обработки информации хорошо реализуется в аналоговых технологиях. В цифровых же технологиях они практически не отработаны. Эта проблема еще ждет своего технического и технологического разрешения.

Тем не менее принцип Ферма устанавливает существование информационных процессов наименьшего времени и дает их параметризацию. Время исполнения всех реальных информационных процессов будет больше предела Ферма. В этом смысле принцип Ферма устанавливает фундаментальные ограничения на время обработки информации.

Итак, пусть I_k , I_n — коммуникационная (обменная, трансляционная) и оперативная (находящаяся в обработке) части информации. Полная информация I равна их сумме

$$I = I_k + I_n.$$

Так же, как и в случае с энергией, определим полное время обработки информации τ_c как сумму трансляционного (обменного) времени τ_k и времени переработки (восприятия) информации τ_n :

$$\tau_c = \tau_k + \tau_n.$$

Введем интегральный инвариант переработки информации в виде памяти J_k и дифференциаль-

ный вариант ее обработки в виде скорости обработки D_n :

$$J_k = \int I_k dt, \\ D_n = I_n / \tau.$$

Тогда полное время обработки информации будет равно

$$\tau_c = \frac{J_k}{I_k} + \frac{I_n}{D_n}.$$

Естественно предположить, что вся информация I_k , извлекаемая из памяти, сразу же идет в обработку:

$$I_k = I_n, \quad I = I_k + I_n = 2I_k = 2I_n.$$

С учетом такого предположения время обработки информации примет вид

$$\tau_c = \frac{2J_k}{I} + \frac{I}{2D_n}.$$

Беря производную от времени переработки информации и приравнявая результат нулю, получаем:

$$I^2 = J_k D_n, \quad I_k^2 = I_n^2 = J_k D_n, \\ \tau_k = \tau_n = \tau = \sqrt{J_k / D_n}, \\ \tau_c = 2\tau = 2\sqrt{J_k / D_n}, \\ \tau^2 = J_k / D_n.$$

Принцип Мопертюи в информационных средах

Чтобы воспользоваться принципом наименьшего действия Мопертюи, необходимо решить вопрос об аналогах энергии и действия в информационной среде.

В качестве аналогов энергии примем скорости обработки информации в процессах трансляции D_k и оперативной обработки D_n . Суммарная скорость получается:

$$D = D_k + D_n.$$

Тогда действие в информационной среде будет определяться самой информацией:

$$I = \int D dt, \quad I_k = \int D_k dt, \quad I_n = \int D_n dt.$$

В локальной области время действия равно τ , поэтому

$$I = D\tau, \quad I_k = D_k\tau, \quad I_n = D_n\tau.$$

При таком определении элементарное инфор-

мационное действие будет равно одному биту информации. Эта единица является аналогом постоянной Планка $\hbar$. Один квант действия в энергетическом пространстве равен постоянной Планка $\hbar$. Один квант действия в информационном пространстве равен одному биту информации.

По аналогии с энергией определим соответствующие скорости обработки информации:

$$\begin{aligned} D_k &= J / (2\tau^2), \quad I_k = J / (2\tau), \\ J_k &= J / 2, \quad J = 2J_k, \\ D_n &= I_n / \tau. \end{aligned}$$

Здесь J — параметр момента инерции в информационной среде. С учетом изложенной аналогии напомним уравнение действия в информационной среде:

$$I = I_k + I_n = J / (2\tau) + D_n \tau. \quad (8)$$

Принцип наименьшего действия Мопертюи в информационном пространстве эквивалентен принципу минимума информации для решения проблемы трансляции и переработки ее в соответствующей задаче. Его можно сформулировать так:

среди всевозможных процессов преобразования и переработки информации в информационной среде при решении задачи существует такой процесс, на реализацию которого требуется минимум информации.

Принцип Мопертюи, как и принцип Ферма, действующий в информационных средах, сформулирован в виде принципа существования минимума. Следовательно, он может быть реализован только в самоорганизующихся информационных средах. Беря производную от информации по времени в уравнении (8), находим:

$$\begin{aligned} I^2 &= 4J_k D_n = 2J D_n, \quad I_k^2 = I_n^2 = J_k D_n, \\ \tau^2 &= J_k / D_n, \quad D_k = D_n, \quad J = 2J_k = I\tau. \end{aligned} \quad (9)$$

Сравнивая результаты действия принципа Мопертюи (9) в принятой аналогии между энергией и информацией с соответствующими результатами действия принципа Ферма в информационной среде, убеждаемся в их эквивалентности. Именно эта эквивалентность оправдывает принятую аналогию и делает ее конструктивной.

Так же, как в энергетических средах, характеристики фононов сигналов волновой природы содержат энергии, интегралы и производные от них, так и в информационных средах соответствующие информационные фононы характеризуются информацией, интегралом и производной от нее. Вся аналогия построена на одинаковости вида соответствующих функциональных уравнений, минимумы которых отыскиваются.

Отсюда делается принципиальный вывод: ин-

формационные задачи по принятой аналогии можно в режиме самоорганизации решать в энергетических средах, где в качестве носителей информации выступают фононы сигналов волновой природы. Время решения задач при этом будет минимальным и неулучшаемым. Существует ряд примеров решения информационно-энергетических проблем в режиме самоорганизации в организованных и управляемых распределенных средах. К таким средам относятся спиночные стекла, сети Хопфилда, нейросети, биоинформационные сети ДНК.

К этим же средам относятся мезоморфные среды, рассмотренные авторами в работе [1]. Ясно одно, что в информационных средах принципы Ферма и Мопертюи дают результат в виде существования соответствующих минимумов, тогда как в энергетических средах эти минимумы реализуются в режиме самоорганизации.

Принятая аналогия информационных и энергетических сред позволяет получить ряд полезных результатов. Так как скорости трансляции и переработки информации равны между собой, то возникает резонансный режим ее обработки без буферного накопления. Суммарная скорость обработки как аналог полной энергии имеет вид

$$D = D_k + D_n = 2D_k = mv^2 = If.$$

Аналог массы информационного фонона можно найти, рассмотрев момент инерции фонона:

$$J = 2J_k = 2I_k \tau = I\tau = m dR^2.$$

Размер фонона равен его длине волны λ , поэтому

$$J = I\tau = m\lambda^2 = mS, \quad S = \lambda^2.$$

Здесь S — эффективная площадь информационного фонона, равная площади элементарной ячейки информации. Отсюда получаем массу информационного фонона:

$$m = J / S = I\tau / S.$$

Как видим, масса выражает плотность информационной памяти в ячейке информации. Получаем нетривиальный и неожиданный результат: масса информационного фонона измеряется временем его памяти. Наименьшая масса получается при минимальной информации 1 бит:

$$I = 1, \quad m = \tau / S, \quad S = \lambda^2.$$

При этом полная скорость обработки такого фонона будет равна

$$D = \tau v^2 / S = f, \quad S = \lambda^2, \quad v^2 / S = f^2.$$

Здесь v — скорость фонона сигнала волновой

природы в информационной среде, λ — длина волны фонона, f — его частота. Принятая аналогия практична и удобна в смысле определенности и измеримости всех необходимых информационных характеристик, а также в смысле возможности моделирования информационных процессов в распределенных физических средах соответствующими сигналами волновой природы.

Управляемость по Глушкову

При развитии современных ЭВМ на основе многопроцессорных комплексов возникает проблема коммутации процессоров комплекса в организации вычислений. Главная цель такого управления связана с ускорением вычислений за счет организации параллельной работы отдельных процессов комплекса. Максимальная скорость вычислений при параллельной работе процессоров получается, когда все процессоры работают без простоев и взаимных ожиданий. Однако это практически нереализуемая цель. Впервые на эту проблему обратил внимание академик В.М. Глушков. Он рассмотрел проблему управления в следующем аспекте.

Пусть имеется n объектов, которыми надо управлять. Между ними возникает n^2 связей, которыми надо управлять, между которыми возникает n^4 связей второго порядка, которыми надо управлять. В целях ускорения процесса управления на каждую связь второго порядка выделим управляющий процессор. Тогда общее количество управляющих процессоров будет равно

$$N = n^4.$$

Как видим, в этой задаче на n работающих процессоров приходится N управляющих. Предполагается, что работающие процессоры составляют общее взаимозаменяемое множество.

В случае одного процессора проблем нет. При $n=1$ имеем $N_1 = 1^4 = 1$. Здесь один процессор в двух функциях: и работает, и управляет собственной работой.

Но уже при одновременной работе двух процессоров, когда $n = 2$, возникает практически непреодолимая проблема: $N_2 = 2^4 = 16$. Если суперпроцессор состоит из 16 процессоров, то в нем одновременно работают только 2 процессора. Скорость вычислений в этом случае возрастает не в 16 раз, как ожидалось, а только в 2 раза.

Простые гипотетические рассуждения, но, как это ни парадоксально, они подтверждаются практикой работы на супер-ЭВМ, состоящих из 16 процессоров. Здесь кроется фундаментальная проблема. Как было показано в предыдущем разделе, минимум времени и максимум скорости обработки информации можно получить в резонансном режиме работы всей информационной среды, ор-

ганизовав в ней движение фононов сигнала волновой природы без ожиданий. Это возможно только в самоорганизующихся распределенных средах квантового или мезоморфного уровня, работающих в аналоговом режиме, принципиальные основы которых рассмотрены авторами в работе [1].

Устойчивость по Эшби—Гарднеру

При обработке данных в режиме реального времени возникает проблема сходимости и устойчивости вычислений. Это, как правило, связано с плохой обусловленностью и выраженностью задачи в рассматриваемой ситуации. Задачи такого типа называют некорректно поставленными. Тем не менее в задачах триангуляции определения места цели такая ситуация возникает часто.

На "катастрофические" результаты потери устойчивости вычислений впервые обратили внимание Эшби и Гарднер в своем модельном эксперименте, описание которого можно найти в работе Д. Каира [9].

Суть вычислительного эксперимента такова. Исследовалась система дифференциальных уравнений первого порядка

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (10)$$

где $\mathbf{X}, \mathbf{X}'$ — вектор переменных и его производная по времени, $\mathbf{A}$ — матрица связи. Изучалась устойчивость системы по Ляпунову при матрицах с разной степенью заполненности ее недиагональных элементов при отрицательных диагональных. Когда матрица $\mathbf{A}$ диагональна с отрицательными элементами, она устойчива по Ляпунову, т.к. вещественные части корней ее собственных значений отрицательны. Это свойство, как правило, сохраняется для слабо заполненных матриц с небольшим числом заполнения недиагональных элементов. Эксперименты показали, что для систем 10-го порядка и выше устойчивость сохраняется, когда заполненность недиагональных элементов матрицы меньше 13 % от их общего числа. Во всех экспериментах эта устойчивость сохранялась с вероятностью, близкой к единице.

Однако, как только число заполненных недиагональных элементов превышало 13 % от их общего количества, картина резко менялась. Устойчивость по Ляпунову "катастрофически", скачкообразно падала по вероятности от единицы до нуля.

Практически Эшби и Гарднер определили порог жизненной "работоспособной" устойчивости систем, режим работы которых описывается динамическими уравнениями первого порядка (10). Заметим, что вся линейная теория систем в переменных состояниях описывает их подобными уравнениями.

На практике пытаются преодолеть отмеченный порог устойчивости решений, вводя регуляризаторы

ры, предложенные академиком А.Н. Тихоновым, в виде диагональных отрицательных элементов. Но здесь возникают свои проблемы исследования асимптотики решений в функции от диагональных возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ЕЩЕ РАЗ О РОЛИ САМООРГАНИЗАЦИИ

Для преодоления порога устойчивости плохо обусловленных и вырожденных задач требуется принципиально новая технология их решения. Некоторые теоретические аспекты такой технологии, основанной на принципах самоорганизации решений, предложены одним из авторов в работе [10].

Однако принципиальные решения в режиме реального времени можно получить в распределенных средах, в которых решения находятся сигналами волновой природы в режиме самоорганизации. Методологические основы таких сред, которые авторы называли мезоморфными, изложены в работе [1].

Следует подчеркнуть как принципиальное положение: будущие информационные технологии будут развиваться в направлении гибридизации с распределенными физическими средами, работающими в режиме самоорганизации сигналов волновой природы.

- строение. 2000. Т. 10, № 2. С. 20–34.
2. Дятлов А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989. 608 с.
3. Джанколи Д. Физика: в 2-х томах (пер. с англ.). М.: Мир, 1989. Том 2. 667 с.
4. Дирак П. Принципы квантовой механики (пер. с англ.). М.: Наука, 1979. 471 с.
5. Фок В.А. Начала квантовой механики. М.: Наука, 1976. 376 с.
6. Шурык Э.В. Вакуум КХД и его возбуждение // Физика элементарных частиц (материалы XX зимней школы ЛИЯФ). Л.: ЛИЯФ АН, 1985. 263 с.
7. Матышев А.А. Изотраекторная корпускулярная оптика. СПб.: Наука, 2000. 376 с.
8. Mugnai D., Ranfagni A. and Ruggeri. Observation of superluminal Behaviors in Wave Propagation // PRL. 1984. No 12. P. 4830–4832.
9. Каур Д. Системология. Автоматизация решения системных задач (пер. с англ.). М.: Радио и связь, 1990. 544 с.
10. Трифанов В.Н. Методические основы синтеза динамических сетей: Алгебраическое равновесие и статистика. Л.: ЛИИАН, 1991. Препринт № 148. 62 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нестеров М.М., Трифанов В.Н. Мезоморфные вычислительные среды // Научное приборо-

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации

Материал поступил в редакцию 06.02.2001.

FUNDAMENTAL RESTRICTIONS ON THE WAVE SIGNAL DETERMINATION

M. M. Nesterov, V. N. Trifanov

Saint-Petersburg Institute of Informatics and Automation

The wave signals are characterized by energy, pulse and information. The Ferma and Mopertue principles are studied as applied to signal time, effect and information. The group and phase velocity of signal propagation are analyzed. Restrictions upon signal processing effect, velocity, controlability and stability are evaluated.