

И. Ю. ПАРАМОНОВ, В. А. СМАГИН

СЛОЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Исследуются свойства информационных сетей, уточняется понятие эффективности и вводится ее показатель — количество информационной работы, выполняемой сетью. Рассматривается важное свойство сети — взаимодействие ее компонентов. Приводится модель расчета вероятности количества выполненной работы для простой и сложной структур сети.

Ключевые слова: сложность, эффективность, информационная сеть, работа, взаимодействие, итерация, вероятность, топология, гипердельтное распределение.

Введение. Среди множества сетей наиболее важными, в силу их критичности для процессов управления, являются сети, предназначенные для сбора, хранения, обработки и передачи информации. Сложность, качество и эффективность функционирования информационных сетей (ИС) принято оценивать с помощью различных критериев и показателей.

Наиболее известными и общими законами, описывающими информационные сети, являются законы Меткалфа, Амдала, Густавсона — Барсиса, Гроша [1, 2].

В работе [1] отмечается, что «эффективность сетевых структур подтверждена математическим законом Меткалфа, в соответствии с которым „полезность“ и „эффективность“ сети пропорциональна квадрату числа ее узлов. Этот закон, перенесенный из области веб-торговли в военную сферу, дает своеобразную максимально возможную оценку эффективности системы датчиков, ... в предположении, что датчики обеспечивают своевременную и достоверную информацию». Однако, по мнению авторов настоящей статьи, понятия „полезность“ и „эффективность“ требуют уточнения. В работах [1, 2] утверждается, что основное ограничение эффективности в условиях сетецентрической структуры обусловлено этапами принятия решений и действий. Математической моделью, которая наиболее близко описывает эти этапы, является закон Амдала (также перенесенный в сферу сетецентрических структур из области моделирования параллельных процессов с использованием суперкомпьютеров). В исходном виде закон Амдала гласит: „увеличение числа ресурсов в системе обеспечивает увеличение суммарной производительности до максимума только в случае ресурсов, допускающих суммирование“ [2].

Применительно к алгоритмам, допускающим распараллеливание, существует, как показано в работе [3], максимальное число процессоров (процессов), обеспечивающих максимальную производительность. Это обусловлено наличием системных ограничений на временные затраты по распараллеливанию алгоритмов и организации самих параллельных вычислений.

Цель настоящей статьи — уточнить понятие эффективности функционирования сети, а также исследовать одно из важнейших ее свойств — взаимодействие компонентов, для чего

предпринята попытка в количественном виде оценить влияние взаимодействия узлов на качество функционирования сети.

Эффективность информационной сети. Примем условие, что сеть и ее узлы являются сложными системами. Сложная система характеризуется множеством возможных состояний, каждое из которых описывается набором конкретных параметров. Следует различать технические и эргатические сложные системы. Применительно к технической сложной системе количество обрабатываемой ею информации не может быть больше суммарного количества информации, обрабатываемой ее узлами. Что касается эргатической сложной системы, то количество обрабатываемой ею информации, согласно принципу Фёрстера [4], может превышать суммарное количество информации, обрабатываемой ее узлами. В данной статье рассматриваются структуры только технических сложных систем.

Эффективность информационной сложной системы — это „комплексное операционное свойство целенаправленного процесса (ЦП) функционирования системы, характеризующее его приспособленность к решению стоящей перед сложной системой задачи“ [5]. Свойства ЦП — результативность, ресурсоемкость и оперативность — в совокупности порождают его комплексное свойство — эффективность.

Рассмотрим такую сложную систему, как отдельный узел информационной сети. Результативность его можно определить количеством информационной работы, выполненной за время t ; оперативность определяется заданным временем t , а ресурсоемкость — средствами, израсходованными на разработку узла, его построение и функционирование. В дальнейшем ресурсоемкость будем считать заранее определенной и будем полагать, что работоспособность узла определяется только его надежностью. Пусть плотность вероятности времени до отказа узла $f(t)$ задана. Исходя из характеристик ресурсоемкости узла полагаем, что в работоспособном состоянии он обладает информационной пропускной способностью I операций в единицу времени. Тогда плотность вероятности количества информационной работы будет равна $g(t) = \frac{1}{I} f\left(\frac{t}{I}\right)$. Вводя данную плотность вероятности для всех узлов сети, определяем

в качестве показателя эффективности сети вероятность выполнения ею определенного количества информационной работы [6].

Взаимодействие узлов сети. Взаимодействие сложных систем целесообразно рассматривать на примерах живых систем (субъектов). Простейшим примером является информационное взаимодействие двух субъектов. Предположим, что два субъекта должны выполнять независимо друг от друга определенную информационную работу в течение времени t . Если оба субъекта выполнили свою работу, цель достигнута. Но если в момент τ , $0 \leq \tau \leq t$, один из субъектов становится неработоспособным, доля невыполненной им работы в течение оставшегося времени должна быть выполнена работоспособным субъектом. Для этого данный субъект должен обладать дополнительным системным ресурсом работоспособности. Предполагая, что такая возможность имеется, можно при задании значений необходимых параметров субъектов решить задачу выполнения необходимой работы двумя субъектами. Если работы разнородны, то субъекты должны располагать соответствующими тезаурусами. Таким образом, процесс взаимодействия живых систем рассмотрен на вербальном уровне.

Процесс взаимодействия узлов информационной сети как неживых систем представляется как передача функций неработоспособного узла одному или нескольким исправным узлам. В данном случае следует применять (вместо тезаурусов) термин „системный ресурс узлов“, под которым понимается информационная пропускная способность i -го узла — I_i . В дальнейшем, чтобы упростить задачу оценивания количества выполняемой сетью работы, будем рассматривать более простой процесс взаимодействия. А именно, полагаем, что узлы сети связаны вероятностными переходами, а системные ресурсы узлов постоянны во времени.

В этих условиях требуется оценить вероятность выполнения сетью переменного количества информационной работы.

Оценивание количества информационной работы сети. Рассмотрим следующий числовой пример [6]. Известна структура сети, стохастический граф ее переходов показан на рис. 1 (здесь $g(s)$ — преобразование Лапласа плотности вероятности $g(t)$, p_{ij} — вероятность перехода).

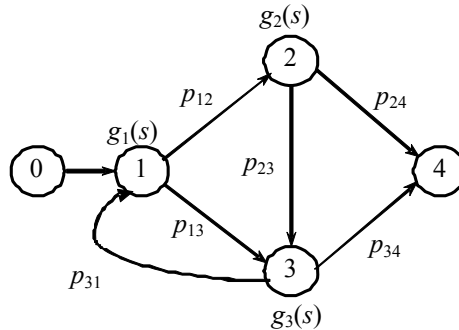


Рис. 1

Требуется оценить вычислительную работу сети, состоящей из трех взаимосвязанных узлов. Заданы значения производительности (пропускной способности) узлов сети: $I_1 = 10$ операций/ч, $I_2 = 7$ операций/ч, $I_3 = 4$ операций/ч; равномерные плотности распределения времени работы узлов: $f_1(t) = \Delta(t - T_1)$, $f_2(t) = \Delta(t - T_2)$, $f_3(t) = \Delta(t - T_3)$, где $T_1 = 12$ ч, $T_2 = 15$ ч, $T_3 = 9$ ч. Изображения плотности распределения количества работы узлов в преобразовании Лапласа принимают вид $g_1(s) = e^{-I_1 T_1 s}$, $g_2(s) = e^{-I_2 T_2 s}$, $g_3(s) = e^{-I_3 T_3 s}$. Матрицы $G(s)$ и $I - G(s)$ представляются в следующем виде:

$$G(s) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{12}g_1(s) & p_{13}g_1(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{23}g_2(s) & p_{24}g_2(s) \\ 0 & p_{31}g_3(s) & 0 & 0 & p_{34}g_3(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

$$I - G(s) = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -p_{12}g_1(s) & -p_{13}g_1(s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p_{23}g_2(s) & -p_{24}g_2(s) \\ 0 & -p_{31}g_3(s) & 0 & 1 & -p_{34}g_3(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Элемент матрицы $(I - G(s))^{-1}$ с номером (0, 4) равен [6]

$$Y_{0,4}(s) = \frac{p_{12}g_1(s)p_{23}g_2(s)p_{34}g_3(s) + p_{12}g_1(s)p_{24}g_2(s) + p_{13}g_1(s)p_{34}g_3(s)}{1 - p_{13}g_1(s)p_{31}g_3(s) - p_{12}g_1(s)p_{23}g_2(s)p_{34}g_3(s)}. \quad (1)$$

Подставляя исходные данные в выражение (1) и полагая $s = 0$, получаем $Y_{0,4} = 1$, что подтверждает выполнимость условия нормирования плотности. Значения трех начальных моментов, найденные с помощью дифференцирования выражения (1) и взятия пределов при $s = 0$, равны: $v_1 = 517,5$ операций, $v_2 = 423,6 \cdot 10^3$ операций², $v_3 = 5,08 \cdot 10^8$ операций³; среднеквадратическое отклонение $\sigma = 394,7$, коэффициент вариации $\eta = 0,763$. Нормируя плотность вероятности с коэффициентом $C = 1,105$, вычисляем новые средние значения моментов: $\bar{v}_1 = 535,1$ операций, $\bar{v}_2 = 4,179 \cdot 10^5$ операций², $\bar{v}_3 = 3,833 \cdot 10^8$ операций³. Для этих значений определим нормальную плотность вероятности, найдем по ней третий начальный момент

и сравним его с третьим моментом, вычисленным с использованием формулы (1). Погрешность этого сравнения не превышает $\delta = 10,5\%$, что является вполне удовлетворительным для аппроксимации нормальным распределением. График вероятности $P(w)$ того, что количество эффективной информационной работы, выполненной сетью, будет не менее w , показан на рис. 2.

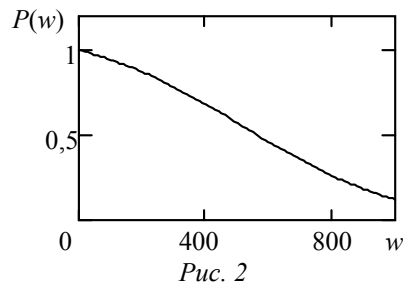


Рис. 2

С помощью предложенной модели можно рассчитать вероятность выполнения сетью заданного количества информационной работы при других распределениях вероятностей.

Произведем сравнение эффективности работы сети и эффективности суммарной работы узлов сети. Для суммарной работы узлов плотность распределения в преобразовании Лапласа будет равна $R(s) = g_1(s)g_2(s)g_3(s)$. Начальные моменты $\nu_1 = 261$ операций, $\nu_2 = 68,12 \cdot 10^3$ операций², $\nu_3 = 17,78 \cdot 10^6$ операций³; $\sigma=0$, $\eta=0$. На рис. 3 показаны следующие графики: $P(w)$ — вероятность работы сети (кривая 1), $P_c(w)$ — вероятность суммарной работы трех узлов сети (кривая 2), $P_3(w)$ — экспоненциальная аппроксимация вероятности $P_c(w)$ (кривая 3, грубая аппроксимация по моменту ν_1).

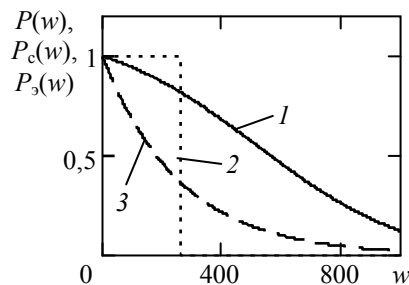


Рис. 3

Сложность и эффективность сети. Графики, приведенные на рис. 3, достаточно убедительно показывают преимущества сетевой организации выполнения работы по сравнению со структурой, не имеющей взаимодействия между узлами. Естественно можно поставить вопрос о том, каковы будут эти преимущества, если сеть будет обладать более сложной внутренней организацией.

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим более сложную структуру. Для этого обратимся к работе Дж. фон Неймана [7], который, изучая проблему построения надежных организмов из ненадежных компонентов, предложил сравнивать надежность „гамакообразных“ структур с надежностью более простых. Для этого он применил принцип структурной итерации и показал, что с увеличением сложности существенно увеличивается структурная надежность.

Рассмотрим следующий пример. Используя принцип итерации, предположим, что сеть (исходная), показанная на рис. 1, состоит (вместо узлов 1, 2, 3) из узлов более сложной структуры. Пусть все три узла имеют одинаковую топологию, аналогичную узлам исходной сети, т.е. каждый узел итеративной сети заменим узлом, топология и параметры которого представляются исходной сетью. Это приведет к тому, что в процессе анализа работы итератив-

ной сети необходимо плотности распределения количества работы узлов заменить плотностью распределения количества работы исходной сети. Далее, определим искомую вероятность количества работы для итеративной сети и сравним ее с вероятностью количества работы, выполненной исходной сетью.

Используем преобразование Лапласа для определения плотности вероятности количества работы исходной сети. Так как для нормального распределения выполнить это достаточно трудно, то воспользуемся приближенной аппроксимацией этой плотности по двум начальным моментам с помощью гипердельтного распределения [8]. Выражение для приближенной нормальной плотности имеет вид

$$f(w) = C_1 \Delta(w - v_1 + \sigma) + C_2 \Delta(w - v_1 - \sigma), \quad (2)$$

где $C_1 = C_2 = 0,5$, $v_1 = 517,5$ операций, $\sigma = 394,7$, и в преобразовании Лапласа формула (2) примет вид

$$g(s) = 0,5(e^{-122,8s} + e^{-912,2s}). \quad (3)$$

Далее, согласно допущению об идентичности узлов итеративной сети можно записать

$$g_1(s) = g_2(s) = g_3(s) = g(s). \quad (4)$$

Подставляя выражение (3) в формулу (1) и вычисля значения начальных моментов итеративной сети, получаем $v_1 = 2953,7$ операций; $v_2 = 1,547 \cdot 10^7$ операций, $v_3 = 1,201 \cdot 10^{11}$ операций, при этом $\sigma = 2,597$, $\eta = 0,879$. В данной аппроксимации третий начальный момент v_3 не используется. Тогда плотность вероятности количества работы итеративной сети с учетом условия нормирования будет равна

$$R'(w) = \frac{1,147}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(w-v_1)^2}{2\sigma^2}}, \quad \int_0^{\infty} R'(z) dz = 1,$$

а вероятность того, что количество информационной работы итеративной сети будет не менее w , определяется по формуле

$$P'(w) = \int_w^{\infty} R'(z) dz. \quad (5)$$

На рис. 4 показаны графики вероятностей для итеративной (кривая 1) и исходной (кривая 2) сетей.

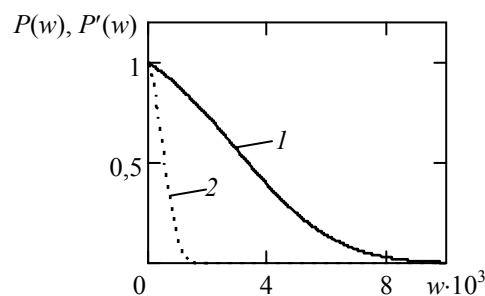


Рис. 4

Сравнительный анализ представленных графиков показывает существенное преимущество итеративной сети по сравнению с сетью более простой организации.

В приведенном примере рассмотрена итеративная сеть первого порядка. Если же каждый составной узел данной сети представить итерационной структурой, т.е. рассмотреть итерацию второго порядка, то выигрыш в эффективности такой сети по сравнению с исходной будет весьма значительным. На этом основании можно сделать вывод, имеющий существенное значение для практики построения сетевых информационных структур, а именно:

чем сложнее организация системы, тем значительнее информационный эффект, измеряемый количеством производимой ею информационной работы.

С учетом темпа развития электроники и совершенствования математического обеспечения компьютеров можно в перспективе ожидать создания более сложных высокопроизводительных сетцентрических структур в целях применения их в гражданской и военной сферах.

Заключение. В представленном исследовании информационных сетей использовано понятие эффективности целенаправленных процессов их функционирования. В качестве показателя эффективности сети принята вероятность достижения ею заданного количества информационной работы.

Важным свойством информационных сетей, в отличие от систем, состоящих из независимых компонентов, является взаимодействие компонентов сети. Учет этого свойства при анализе количества информационной работы сети приводит к повышению эффективности ее функционирования. Применение итерационного принципа построения сложных структур сетей позволяет, в свою очередь, увеличить эффективность их функционирования, на один и более порядков превышающую эффективность систем, не обладающих эффектом взаимодействия компонентов.

Результаты исследований могут быть использованы как для оценивания эффективности информационных сетей, так и для разработки и построения новых более сложных сетей различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивлев А. А.* Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации: Монография. М.: Изд-во АСТ, 2008. 64 с.
2. *Kopp C.* Network Centric Warfare Defence // Today Magazine. Aug. 2003 [Электронный ресурс]: <<http://www.ausairpower.net/new.pdf>>.
3. *Парамонов И. Ю., Смагин В. А.* Закон Амдала для иерархических вычислительных систем // Вестн. Орловск. гос. ун-та. 2012. № 4. С. 22—28.
4. *Фёрстер Г.* Био-логика // Проблемы бионики / Г. Фёрстер, Д. Тепас, Дж. Харсхорн и др.; Пер. с англ. М: Мир, 1965. С. 7—23.
5. *Петухов Г. Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. Методология, методы, модели. МО СССР, 1989. 660 с.
6. *Смагин В. А., Парамонов И. Ю.* Оценивание количества информационной работы вычислительной сети // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 16—20.
7. *Фон Нейман Дж.* Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонентов // Автоматы: Сб. статей. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
8. *Смагин В. А., Филимонович Г. В.* О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // Автоматика и вычислительная техника. 1990. № 3. С. 25—31.

Сведения об авторах

Иван Юрьевич Парамонов

— канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; докторант; E-mail: ivan_paramonov@mail.ru

Владимир Александрович Смагин

— д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра метрологического обеспечения, Санкт-Петербург; E-mail: va_smagin@mail.ru

Рекомендована отделом перспектив развития АСУ и связи ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
12.03.13 г.