

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭФФЕКТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

CONCEPTUAL APPROACH TO DESIGNING EFFICIENT INFORMATION SYSTEMS IN THE PRESENCE OF UNCERTAINTY

A. Alekseev

Summary. The paper suggests a way to present a distributed information system as a multicommodity network model that demonstrates the dual character of connections between the elements of the system. The efficiency of such networks is studied regarding their ability to fulfil the requirements of their elements in the presence of uncertainty. Using the concept of the difficulty of achieving the goal, the authors developed an algorithm for analyzing the efficiency of the multicommodity network. The algorithm can be used to assess the efficiency of the system functioning in different conditions with different parameters. The suggested tools help to determine the most efficient version of the system, which can eventually broaden the scope of application domains of such systems.

Keywords: Information Networks, Efficiency, Difficulty of Achieving the Goal, Multicommodity Network.

Алексеев Антон Павлович

Аспирант, Воронежский Государственный

Университет

Evil-Emperor@mail.ru

Аннотация. Предлагается способ представления распределенной информационной системы посредством модели многопродуктовой сети, отражающей двойственный характер взаимосвязей элементов системы. Исследуются вопросы оценки эффективности таких сетей с точки зрения выполнения взаимных требований компонентов системы с учетом возникающей неопределенности. На основе теории трудности достижения цели разработан алгоритм анализа эффективности многопродуктовой сети, который позволяет проводить оценку эффективности информационной сети при постоянном изменении ее параметров. Применение предлагаемых инструментальных средств позволяет находить наиболее эффективный вариант построения информационной системы, что в перспективе открывает широкие возможности при проектировании таких систем специалистами различных технических отраслей.

Ключевые слова: информационные сети, эффективность, трудность достижения цели, многопродуктовая сеть.

Введение

Круг задач, решаемых с использованием компьютерных сетей, достаточно широк [5], и каждая из этих задач предъявляет свои специфические требования к качеству обслуживания, обеспечиваемого сетью, что должно учитываться на этапе её проектирования. При проектировании информационных систем с той или иной степенью точности решают задачу выбора состава технических и программных средств при ограниченных ресурсах [11], которые должны быть использованы максимально эффективно.

Принцип максимально эффективного использования ресурсов сетей подразумевает возможность качественной и количественной адаптации, наиболее полное использование всех ресурсов и сервисов, надежность, доступность, безопасность [10]. Необходимо учитывать взаимодействие различных элементов и узлов сети между собой в условиях неопределенности. Основной характеристикой использования ресурсов сетей, которая в различной форме учитывается при расчете и проектировании сетевых структур, является пропускная способность участка сети или всей сети. Пропускная способность не является пользовательской характеристикой,

так как она говорит о скорости выполнения внутренних операций сети — передачи пакетов данных между узлами сети через различные коммуникационные устройства [6]. Зато она непосредственно характеризует эффективность выполнения основной функции сети, т.е. транспортировки сообщений, и во многом зависит от функционирования сети в целом как системы, поэтому чаще используется при анализе производительности сети, чем другие характеристики. Однако зачастую только показателей пропускной способности недостаточно для оценки эффективности сети, так как в зависимости от задачи, решаемой конкретной сетью, более важными показателями ее функционирования могут быть такие характеристики, как стоимость передачи информационного потока, длина пути передачи или гибридные оценки, т.е. необходимо сопоставление показателей работы сети с четко определенными требованиями к этим показателям. Наконец, необходимо учитывать изменяющиеся условий внешней и внутренней среды, способные существенно повлиять на функционирование сети.

Отметим, что большинство задач построения компьютерной сети связано более с техническими характеристиками вычислительно-коммуникационных устройств [5], чем с эффективностью их использования для ре-

шения определенной задачи, поэтому в данной статье нами предлагается вариант решения задачи анализа эффективности функционирования информационной сети в условиях неопределенности с помощью численной модели, позволяющей оценить взаимодействие между всеми парами узлов сети и найти множество оптимальных маршрутов, обеспечивающих оптимальное взаимодействие. Предлагаемая модель учитывает различные типы неопределенности, возникающие вследствие влияния внешней среды, а также позволяет провести анализ зависимости эффективности сети от различных параметров неопределенности. Данный алгоритм позволяет сравнить несколько вариантов информационной сети с целью выбора наиболее эффективного проекта.

Моделирование информационной системы в виде многопродуктовой сети

Важным при проектировании информационных систем и сетей является разработка формализованного описания [3], при этом необходимо использовать методы структурного моделирования, основанные на использовании графовых представлений. Модель компьютерной сети можно представить, как агрегацию логической и структурной составляющих, изображенных в виде графов на одном и том же пространстве вершин [3]. Граф структурной составляющей назовем физическим, т.к. он отражает условную физическую инфраструктуру передачи информационных потоков от одного узла к другому, а граф логической составляющей обозначим, соответственно, как логический, он отражает структуру связей между элементами системы, а именно взаимные требования узлов сети к передаче потоков. Пары вершин логического графа обозначим как тяготеющие пары. Объединение указанных двух графов в одну систему обусловлено тем, что связь между узлами, соединенными ребрами логического графа, т.е. тяготеющими парами, может осуществляться только по ребрам физического графа, эта математическая модель получила название многопродуктовая сеть [7]. Название «многопродуктовая» объясняется не взаимозаменяемостью потоков различных тяготеющих пар, каждый информационный поток предназначен для конкретного получателя и не может быть заменен на другой поток, считается, что эти потоки соответствуют как бы разным видам продуктов и не смешиваются [1].

Оценка требований тяготеющих пар к потокам выражается в определенных условных единицах, будь то количество потока, его стоимость или другая характеристика. Ребрам логического графа присваиваются соответствующие числа условных единиц потока для данной тяготеющей пары. Ребра физического графа так или иначе ограничивают потоки между любыми тяготею-

щими парами по данному каналу связи, поэтому каждому ребру присваивается характеристика, измеряемая в тех же условных единицах, что и требования тяготеющих пар, будто то пропускная способность, цена потока и т.д. Задача распределения потоков в сети состоит в том, чтобы проложить по ребрам физического графа оптимальные пути для каждой пары узлов, соединенных ребрами логического графа, удовлетворяя требования обоих графов [1, 7]. Характер системы может также требовать минимизации стоимости потоков, нахождения кратчайших путей для них, поиска максимального потока минимальной стоимости и т.д., тогда ребрам сети соответствуют другие показатели, например, стоимость или длина пути. В дальнейшем все такие показатели мы будем кратко именовать как характеристики ребер сети. В любом случае, принцип оценки эффективности сети не меняется — требования всех тяготеющих пар должны быть выполнены наилучшим образом при данных ограничениях физического графа.

В данной модели информационной сети можно выделить три типа неопределенности [2].

Первый связан с требованиями тяготеющих пар: эти требования не известны или неточно известны во время принятия решений, либо существует объективная, но заранее неизвестная, необходимость повышения этих параметров.

Второй связан с характеристиками ребер физического графа. Предполагается, что эти характеристики будут ниже рассчитанных при проектировании величин, скорее всего, в результате внешних воздействий.

Третий связан с слабо формализуемыми факторами, в результате воздействия которых характеристики ребер и требования элементов сети остаются неизменными, но способность системы выполнять эти требования тем не менее уменьшается.

В дальнейшем будем обозначать любое непредвиденное или нежелательное событие (либо их совокупность), способное нарушать функционирование сети, как инцидент [2]. Силу воздействия инцидента на систему определим как тяжесть инцидента. Гарантированное оценивание функциональных возможностей сети в условиях воздействия инцидента предлагает поиск наилучшего для сети исхода инцидента, т.е. поиск варианта изменения соответствующих характеристик, приводящего к максимальному ущербу функционированию сети. При этом эффективность сети определяется ее способностью обеспечить предельные потоковые требования тяготеющих пар. Наиболее информативным способом анализа эффективности будет многократное оценивание эффективности сети с изменением различных пара-

метров неопределенности, т.е. нахождение зависимости эффективности сети от факторов неопределенности.

Оценка эффективности многопродуктовой сети

Говоря об эффективности многопродуктовой сети, представляющей информационную систему, мы подразумеваем комплексную характеристику, показывающую насколько хорошо данная сеть способна выполнять требования всех тяготеющих пар [2]. Или, другими словами, насколько потоки, передаваемые по каналам физического графа сети, соответствуют требованиям, которые к ним предъявляют элементы логического графа сети. Трудность удовлетворения требований тяготеющей пары возрастает по мере увеличения этих требований и снижения качества потока между элементами этой пары. Говоря о качестве потока, мы подразумеваем меру соответствия этого потока требуемым характеристикам сети (обычно, пропускным способностям). Если качество хотя бы одного потока не удовлетворяет минимальному показателю, то выполнить требования невозможно. Эта зависимость находит отражение в понятии трудности достижения результата, впервые введенного И.Б. Руссманом в работе [9]. Понятие «трудность» исходит из соображений о том, что получить результат определенного качества тем труднее, чем ниже качество ресурсов, подаваемых на входе, и выше требования к качеству результата на выходе, при прочих равных условиях [8].

Вкратце опишем, что из себя представляет оценка трудности достижения цели в математическом смысле. Величиной μ_i обозначим оценку качества объекта, заданную в полуинтервале $0 < \mu_i \leq 1$. Так как не все значения качества достижимы, имеет смысл ввести минимальное требование к качеству ε_i , так же заданное в полуинтервале $0 \leq \varepsilon_i < 1$. Невыполнение минимального требования к качеству автоматически ведет к невыполнению требований качества результата, поэтому $\varepsilon_i \leq \mu_i$. Чтобы определить трудность $d_i(\mu_i, \varepsilon_i)$ как функцию оценки качества объекта и требования к качеству, нужно обозначить свойства этой функции [9]:

1. $d_i(\mu_i, \varepsilon_i) = 1$, при $\mu_i = \varepsilon_i$, т.е. трудность достигает максимума, когда качество находится на минимальном уровне.
2. $d_i(\mu_i, \varepsilon_i) = 0$, при $\mu_i = 1, \mu_i > \varepsilon_i$, т.е. трудность минимальна, когда качество достигает своего максимального значения.
3. $d_i(\mu_i, \varepsilon_i) = 0$, при $\mu_i > 0, \varepsilon_i = 0$, т.е. трудность минимальна при любом качестве, если требований к качеству нет.

На основании соблюдения этих трех условий была выведена следующая формула оценки трудности достижения цели [8]:

$$d_i = \frac{\varepsilon_i(1 - \mu_i)}{\mu_i(1 - \varepsilon_i)} \quad (1)$$

при этом $d_i(0,0) = 0$ и $d_i(1,1) = 1$.

Так как качество результата можно трактовать как иерархическую совокупность его отдельных свойств, то оценка качества результата, выражаемая через частные трудности d_i должна быть интегральной и являться функцией оценок отдельных свойств. В работе И. Б. Руссмана доказано, что только одна функция двух переменных соблюдает эти требования [4]:

$$D = d_1 + d_2 - d_1 d_2 = 1 - (1 - d_1)(1 - d_2) \quad (2)$$

Эта формула легко обобщается на случай нескольких компонент [4]:

$$D = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - d_k) \quad (3)$$

Характеристики потоков в исследуемой сети могут быть весьма различными (величина потока, стоимость потока и т.д.) как по единицам измерения, так и направленности, кроме того, поток может характеризоваться сразу несколькими параметрами (например, максимальный поток минимальной стоимости), поэтому показатели трудности достижения цели являются очень удобным и гибким инструментом для оценки соответствия потока в многопродуктовой сети требованиям, предъявляемым к нему тяготеющими парами.

С учетом вышесказанного, будем обозначать эффективность многопродуктовой сети как комплексную оценку трудности достижения цели. Эта комплексная оценка находится по формуле 3, где в качестве частных оценок трудности выступают показатели выполнения требований каждой тяготеющей пары. Качеством потока между элементами тяготеющей пары будем называть характеристику этого потока (величина потока, стоимость потока и т.д.), а требованием к качеству потока — само требование тяготеющей пары.

Алгоритм оценки эффективности информационной сети с учетом неопределенности

Воспользуемся стандартной математической структурной моделью многопродуктовой потоковой сети, $S = (V, P)$ которая задается множествами: $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ — узлов сети и $P = \{p_1, \dots, p_m\} \in V \times V$ — тяготеющих пар или ребер логического графа сети. Соответствующие индексные множества будем обозначать: $N = \{1, \dots, n\}$ и $M = \{1, \dots, m\}$, так что $V = \{v_i\}_{i \in N}$ и $P = \{p_k\}_{k \in M}$.

Для любой вершины $v \in V$ обозначим через $S(v)$ множество индексов выходящих из неё дуг, а через $T(v)$

множество индексов входящих [7]. Для каждой k -й тяготеющей пары введем обозначение $p_k = (v_{sk}, v_{tk})$, где $s_k < t_k$ и вершина v_{sk} называется источником, а v_{tk} — стоком k -го вида продукта. Значение g_k — это поток между источником и стоком для каждой тяготеющей пары $p_k \in P$.

В сети имеются количественные ограничения, определяемые пропускной способностью физического графа [2]. Формально припишем каждому ребру (v_i, v_j) сети некоторое число $c_{ij} \geq 0$, называемое характеристикой ребра (пропускная способность, стоимость прохождения потока, длина пути и т.д.) (v_i, v_j) и измеряемое в условных единицах потока, для которого предназначена данная сеть. В дальнейшем будем предполагать, что речь идет о пропускных способностях. Кроме того, всем ребрам $p_k \in P$ логического графа приписаны числа $y_k \geq 0$, измеряемые в условных единицах потока, и которые требуется пропустить по данному логическому ребру сети.

Очевидно, что для решения задачи о допустимости необязательно строить все возможные распределения потоков в физической сети, достаточно лишь найти распределения, обеспечивающие лучшие потоки между всеми тяготеющими парами. Обозначим как z_k наилучший из всех возможных потоков g_k . Множество таких потоков будем обозначать как $Z(c) = \{z_k\}$. Эта матрица потоков обеспечивает сети максимальную эффективность функционирования [2].

Представим тяжесть инцидента как вектор трех переменных $W = \{\beta, \gamma, \delta\}$:

Параметр β — показатель, показывающий ожидаемое повышение требований любой тяготеющей пары.

Параметр γ — показатель, показывающий ожидаемое снижение характеристик любого ребра сети.

Параметр δ — показатель, отражающий слабо формализуемые факторы и ожидаемое повышение трудности выполнения требований любой тяготеющей пары.

Используя введенные обозначения, разработаем алгоритм анализа эффективности для описанной сети. Он единообразен для всех видов характеристик ребер физического графа и отличается только способом получения матрицы $Z(c)$.

1. Построить физический и логический графы в соответствии с моделью многопродуктовой сети.

2. Оценить лучшие потоки между тяготеющими парами, т.е. матрицу $Z(c)$. Для ее нахождения следует применять алгоритмы теории графов, соответствующие характеристикам потоков.

3. Построить матрицу оценок трудности достижения цели для всех тяготеющих пар. Оценим качество потоков z_k так:

$$\mu_k = \frac{z_k}{\bar{Z} + Z_{corr}}, \tag{4}$$

Где $\bar{Z} = \max_{1 \leq k \leq m} z_k$.

Z_{corr} — специальный параметр для возможных корректировок эталонного качества.

Требования к качеству потоков находятся по формуле:

$$\varepsilon_k = \frac{y_k}{\bar{Z} + Z_{corr}} \tag{5}$$

Оба типа показателей μ и ε меняются в интервале $[0,1]$, причем $\varepsilon_k \leq \mu_k \forall k$ для любой тяготеющей пары. Комбинации, для которых это условие не выполняется, не удовлетворяют минимальным требованиям качества. В остальных случаях показатель трудности вычисляется как:

$$d_k = \varepsilon_k(1 - \mu_k) / \mu_k(1 - \varepsilon_k) \tag{6}$$

Также учтем весовые коэффициенты α_k в диапазоне $0 < \alpha_k \leq 1$. Тогда множество трудностей выполнения требований тяготеющих пар можно обозначить как:

$$D = \{d_k^{\alpha_k} \mid d_k^{\alpha_k} = 1 - (1 - d_k)^{\alpha_k}\} \tag{7}$$

Комплексная трудность D_{int} находится по формуле:

$$D_{int} = \sum_{k=1}^m d_k^{\alpha_k} \tag{8}$$

Этот показатель характеризует общую трудность выполнения требований всех тяготеющих пар сети и служит критерием эффективности системы. При $D = 1$ трудность выполнения взаимных требований элементов сети максимальна, сеть работает на пределе своих возможностей. Если хоть один из показателей d_k превышает 1 (в случае $\varepsilon_k > \mu_k$), то комплексная трудность также $D > 1$, поток между данной тяготеющей парой не удовлетворяет требованиям.

4. Оценить ожидаемую тяжесть инцидента $W = \{\beta, \gamma, \delta\}$. Тяжесть может быть найдена посредством решения специальных задач [2] или оценена экспертными методами.

5. Найти матрицу C^r ожидаемых характеристик ребер физического графа после воздействия инцидента и вектор Y^p ожидаемых требований.

Новые показатели сети находятся так:

$$c_{ij}^{\gamma} = (1 - \gamma) c_{ij}^0 \quad (9)$$

$$y_{ij}^{\beta} = (1 + \beta) y_{ij}^0 \quad (10)$$

Необходимо повторить шаги 2 и 3 с новыми показателями сети, вычислив эффективность сети в условиях инцидента, оцененного на шаге 4.

Слабо формализуемые факторы можно оценить по формуле ниже:

$$d_{ij}^{\delta} = (1 + \delta) d_{ij}^0 = 1 - (1 - d_{ij}^0)^{(1+\delta)} \quad (11)$$

Полученную в итоге комплексную оценку можно рассматривать как показатель эффективности функционирования сети в условиях инцидента определенной тяжести.

6. Повторять шаг 5 для постепенно возрастающей тяжести инцидента до тех пор, пока сеть не перестанет быть допустимой. Таким образом, можно найти максимальную тяжесть инцидента, которую способна выдержать сеть. Показатель эффективности рекомендуется отмечать на графике для каждого показателя тяжести.

7. Повторять шаг 6 для различных вариантов воздействий инцидента (т.е. с неопределенностями всех трех

типов), в результате чего получится несколько графиков, отражающих зависимость эффективности сети от факторов неопределенности.

8. Выполнить шаги 1–7 для другого варианта сети с целью выбора наилучшего с точки зрения параметра эффективности.

Таким образом, полученный алгоритм позволяет отыскать тот вариант проектирования информационной сети, который обладает наибольшей эффективностью.

Заключение

Проектирование распределенных информационных систем должно осуществляться посредством развитого аппарата исследования сложных сетей, что позволяет создавать наиболее эффективные сетевые структуры. Моделирование информационной сети посредством модели многопродуктовой сети и исследование вопросов оценки эффективности такой сети с учетом неопределенности позволили разработать специальный алгоритм для анализа эффективности такого рода систем, основанный на теории трудности достижения цели. Разработанные инструментальные средства могут использоваться при проектировании информационных систем в условиях неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А. П. Анализ уязвимости многокомпонентной системы как многопродуктовой сети / А. П. Алексеев // Ежемесячный международный научный журнал «European multi science journal». — 2017. — № 9. — С. 51–54.
2. Алексеев А. П. Задача оценки эффективности функционирования системы в условиях внешних воздействий / А. П. Алексеев, Г. В. Абрамов, И. Н. Булгакова // Международная научная конференция «IEEE Northwest Russia Conference On Mathematical Methods In Engineering And Technology: MMET NW 2018»: Сборник докладов, Санкт-Петербург, 10–14 сентября 2018 г. / СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2018. — С. 194–197.
3. Алексеев А. П. Использование синергетического подхода при моделировании и модернизации информационных сетей / А. П. Алексеев, Г. В. Абрамов, И. Н. Булгакова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2017. — № 12–5 (66). — С. 41–48.
4. Каплинский А. И., Руссман И. Б., Умывакин В. М. Моделирование и алгоритмизация слабо-формализованных задач выбора наилучших вариантов системы. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 168 с.
5. Катаев М. Ю., Крупский А. С. Оценка пропускной способности на основе модели однородной сети / М. Ю. Катаев, А. С. Крупский // Доклады ТУСУРа. — № 2 (36). — июнь 2015.
6. Куделькина Н. Н. Системы передачи данных. Курс лекций для специальности 210407 «Эксплуатация средств связи» / Н. Н. Куделькина. Томский техникум железнодорожного транспорта. — Томск. — 2010.
7. Малашенко Ю. Е. О решении многопродуктовой задачи с целочисленными потоками / Ю. Е. Малашенко, А.-И. А. Станевичюс // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. — 1982. — том 22. — № 3. — С. 732–735.
8. Руссман И. Б. Интегральные оценки качества в организационных системах / И. Б. Руссман // Сборник «Структурная адаптация сложных систем управления». — Воронеж: Изд. ВПИ. — 1977. — С. 90–92.
9. Руссман И. Б. Комплексная оценка системы и оценки подсистем / И. Б. Руссман // Изв. АН СССР. Сер. Техн. Кибернетика. — 1978. — № 2. — С. 201–204.
10. Степанова И. В. Методы повышения пропускной способности уровня абонентского доступа / И. В. Степанова, С. В. Булатов // Журнал Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — № 2–2009.
11. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум. — СПб.: Питер, 2008. — 992 с.