МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ КОММУНИКАЦИЙ КОРПОРАТИВНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНЗАКЦИЙ ПО МАРШРУТАМ

В данной статье рассмотрены вопросы моделирования транспортных коммуникаций корпоративных компьютерных сетей. Предлагается два подхода решения задачи: построение модели распределения потоков данных на основе методов максимизации энтропии, а также использование гравитационной модели распределения транзакций. В соответствии с предлагаемыми подходами представлены гравитационная и энтропийная модели распределения потоков данных. Показана практическая значимость предложенных подходов.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании систем управления распределенными корпоративными информационными технологиями, для того чтобы оценить интенсивность потоков данных (порождаемых задачами управления) между различными хостами сети, а также для моделирования распределения потоков данных по участкам транспортной сети, обычно используется некоторая математическая модель [1]. Эта модель, как правило, должна состоять из четырех подмоделей, которые связаны с генерацией трафика, распределением запросов по коммуникациям, расщеплением типов коммуникаций (маршрутов) и размещением общих сетевых ресурсов сети. В этой статье вопросы, связанные с назначениями транзакций, не рассматриваются; здесь предполагается, что некоторые оценки транзакций в конечных пунктах заранее известны. Некоторые результаты статистического моделирования позволяют делать определенные выводы по размещению информационных ресурсов, но нас в основном будут интересовать распределение транзакций и расщепление типов коммуникаций [2]. Для решения этих задач будут применяться методы максимизации энтропии [3].

Цель статьи заключается в том, чтобы показать главное преимущество методов максимизации энтропии в области транспортных задач, которое состоит в том, что они помогают строить модели, описывающие довольно сложные явления, а также в том, что они допускают прямую интерпретацию полученных уравнений.

В связи с этим возникают следующие задачи:

1) подробно рассмотреть вопросы, связанные с гравитационной моделью распределения транзакций [2];

2) показать, как необходимо строить модели распределения потоков данных на основе методов максимизации энтропии;

3) привести ряд выводов, существенных для интерпретации полученных результатов моделирования.

1 ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ДАННЫХ

Задача, которая ставится перед любой моделью распределения транзакций, заключается в оценке числа транзакций между каждой парой «точек» [4, 5]. Под «точкой» в данном случае понимается некоторый общий сетевой ресурс компьютерной сети. Предполагается, что рассматриваемая корпоративная сеть некоторым подходящим образом разбита на подсети [6].

Для простоты рассмотрим в качестве примера формирование и передачу запросов к файл-серверам корпоративной сети. Пусть T_{ij} – число транзакций (обращений к сетевому ресурсу), а C_{ij} – затраты на передачу из сети i в сеть j; пусть Q_i – полное число отправленных запросов из сети i к файл-серверам других сетей, а D_j – полное число принятых запросов файл-сервером сети j. Модель распределения транзакций оценивает T_{ij} как функцию от Q_i, D_j, C_{ij}. Эти величины сами также могут зависеть от других независимых переменных.

Наиболее простая модель такого типа – это так называемая гравитационная модель, разработанная по аналогии с ньютоновским законом, связывающим силу притяжения F_{ij} между двумя массами m_i и m_j, расположенными на расстоянии d_{ij} друг от друга [2]

$$F_{ij} = \gamma \frac{m_i m_j}{d_{ij}^2}, \qquad (1)$$

где γ – некоторая константа. По аналогии транспортная гравитационная модель может быть представлена в виде:

$$T_{ij} = k \frac{Q_i D_i}{c_{ij}^2}, \qquad (2)$$

где k – некоторая константа, а затраты на передачу c_{ij} выступают в качестве «расстояния». Согласно уравнению (2) величина T_{ij} пропорциональна Q_i и D_j и обратно пропорциональна квадрату «расстояния» между ними. Но у этого уравнения имеется, по меньшей мере, один очевидный недостаток: если удвоить заданные значения Q_i и D_j, то число транзакций между этими сетями в соответствии с (2) учетверится, а естественно ожидать, что оно лишь удвоится. Или более точно: величины T_{ij} всегда должны удовлетворять следующим ограничениям (число отправленных запросов из всех сетей в сеть j должно быть равно количеству прибывших запросов в сеть j):

$$\sum_i T_{ij} = D_i, \qquad (3)$$

$$\sum_i T_{ij} = Q_i, \qquad (4)$$

а уравнение (1) этого не обеспечивает. Это означает, что суммы по строкам и столбцам матрицы транзакций должны совпадать с числом запросов из каждой сети, и с числом полученных запросов в каждой сети соответственно. Этим ограничениям можно удовлетворить, если ввести наборы констант A_i и B_j, связанные соответственно с сетями источниками и сетями назначения. Иногда их называют балансирующими множителями. Кроме того, нет оснований считать, что расстояние играет в уравнении (2) такую же роль, что и в ньютоновской физике, поэтому используем более общую форму функции расстояния $f(c_{ij})$. Модифицированная гравитационная модель, при этом, будет иметь следующий вид:

$$T_{ij} = A_i B_j Q_i D_j f(c_{ij}), \qquad (5)$$

где

$$A_i = \left[\sum_i B_j D_j f(c_{ij})\right]^{-1}, \qquad (6)$$

$$B_j = \left[\sum_i A_i Q_i f(c_{ij})\right]^{-1}. \qquad (7)$$

Уравнения для A_i и B_j решаются иттерационными методами, и можно утверждать, что они гарантируют, что величины T_{ij} из уравнения (5) удовлетворяют ограничениям (3) и (4). Отметим также, что величины c_{ij} в такой модели могут служить общей мерой «сопротивления» передач данных между сетями i и j, в качестве которой могут выступать: географическое расстояние, время передач, затраты на передачи или, что часто бывает более эффективным, взвешенная комбинация этих факторов, которую иногда называют «обобщенными затратами».

Рассмотрим другой способ получения гравитационной модели транспортной системы с помощью максимизации энтропии [3], используя вначале другую физическую аналогию. Для этого введем дополнительное к (3) и (4) ограничение на T_{ij}. Это ограничение имеет вид:

$$\sum_i \sum_j T_{ij} c_{ij} = C. \qquad (8)$$

Тогда наиболее вероятным распределением транзакций будет матрица $\{T_{ij}\}$, максимизирующая энтропию

$$\ln W(\{T_{ij}\}) = \ln T! - \sum_i \sum_j \ln T_{ij}!, \tag{9}$$

где T – полное число транзакций при ограничениях (3), (4), (8). Если учесть, что $W(\{T_{ij}\})$ – полное число состояний системы, соответствующих распределению $\{T_{ij}\}$, то число всех состояний системы можно оценить по формуле [3]

$$w = \sum W(\{T_{ij}\}), \tag{10}$$

где суммирование проводится по всем T_{ij}, удовлетворяющим (3), (4) и (8). При этом оказывается, что максимальное значение $W(\{T_{ij}\})$ настолько доминирует над всеми остальными членами суммы, что распределение $\{T_{ij}\}$, соответствующее максимуму энтропии, является существенно наиболее вероятным распределением.

Для получения набора T_{ij}, максимизирующего $\ln W(\{T_{ij}\})$ из уравнения (9) при ограничениях (3), (4) и (8), следует максимизировать лагранжиан L, равный

$$L = \ln W + \sum_i \lambda_i^{(1)}\left(Q_i - \sum_j T_{ij}\right) + \sum_j \lambda_j^{(2)}\left(D_j - \sum_i T_{ij}\right) +$$

$$+ \beta\left(C - \sum_i \sum_j T_{ij} c_{ij}\right), \tag{11}$$

где $\lambda_i^{(1)}$, $\lambda_j^{(2)}$ и β – множители Лагранжа. Поскольку предполагается, что количество транзакций T_{ij} достаточно велико, то можно воспользоваться формулой Стирлинга [3] ($\ln T_{ij}! = T_{ij}\ln T_{ij} - T_{ij}$ – эта замена справедлива для больших значений T_{ij}), согласно которой из (9) получим

$$\ln W = -\sum_i \sum_j T_{ij} \ln T_{ij}.$$

Значения T_{ij}, которые доставляют максимум L и, следовательно, являются наиболее вероятным распределением транзакций, представляют собой решение системы уравнений $\dfrac{\partial L}{\partial T_{ij}} = 0$ совместно с ограничениями (3), (4) и (8).

Будем иметь

$$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}} = \ln T_{ij} - \lambda_i^{(1)} - \lambda_j^{(2)} - \beta c_{ij}.$$

Это выражение будет равно нулю, когда

$$T_{ij} = \exp(-\lambda_i^{(1)} - \lambda_j^{(2)} - \beta c_{ij}). \tag{12}$$

Подставляя (12) в (3) и (4), получим выражения, используя которые можно определить $\lambda_i^{(1)}$ и $\lambda_j^{(2)}$:

$$\exp(-\lambda_i^{(1)}) = Q_i \left[\sum_j \exp(-\lambda_j^{(2)} - \beta c_{ij})\right]^{-1}, \tag{13}$$

$$\exp(-\lambda_j^{(2)}) = D_j \left[\sum_i \exp(-\lambda_i^{(1)} - \beta c_{ij})\right]^{-1}. \tag{14}$$

Чтобы представить окончательный результат в более привычном виде, запишем

$$A_i = \frac{\exp(-\lambda_i^{(1)})}{Q_i}, \tag{15}$$

$$B_j = \frac{\exp(-\lambda_j^{(2)})}{D_j}. \tag{16}$$

Отсюда

$$T_{ij} = A_i B_j Q_i D_j \exp(-\beta c_{ij}), \tag{17}$$

и в соответствии с уравнениями (13)–(16) имеем

$$A_i = \left[\sum_j B_j D_j \exp(-\beta c_{ij})\right]^{-1}, \tag{18}$$

$$B_j = \left[\sum_j A_i Q_i \exp(-\beta c_{ij})\right]^{-1}. \tag{19}$$

Таким образом, наиболее вероятное распределение транзакций является таким же, как в рассмотренной ранее гравитационной модели, которая определена уравнениями (5)–(7). Причем функция f была заменена на экспоненту с отрицательным показателем степени. Таким образом, статистическая теория утверждает [5, 7–9], что при заданных величинах запросов данных в удаленную сеть и приема их в каждой сети назначения и однородной цели запросов, при заданных затратах на передачу данных между сетями и фиксированных полных затратах на транспортировку, в корпоративной сети существует наиболее вероятное распределение транзакций между локальными сетями, и это распределение совпадает с тем, которое задается гравитационной моделью.

2 ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенность статистической механики состоит в том, что параметры, появляющиеся в уравнении, которое описывает наиболее вероятное распределение, имеют определенный физический смысл. То же самое справедливо и здесь в нашем случае. Величины Q_i, D_j и c_{ij} были определены ранее, а выражение $\exp(-\beta c_{ij})$ появляется в этой формулировке как явная форма зависимости от расстояния, причем параметр β определяется теоретически через уравнение (11). Но он имеет свою обычную интерпретацию. Он тесно связан со средним расстоянием между парами соединений: чем больше β, тем меньше среднее расстояние. Этот факт очевидным образом связан с величиной C в уравнении (8). Если увеличить C, то увеличатся затраты на передачи, и среднее расстояние передач данных возрастает; анализ левой части (8) показывает, что β при этом уменьшится.

Осталось интерпретировать A_i и B_j. Пусть одна из величин D_j изменяется, например, D_1. Тогда величины

$$T_{i1} = A_i B_1 Q_i D_1 \exp(-\beta c_{i1}), \qquad (20)$$

характеризующие запросы из каждой сети i в сеть 1, изменятся пропорционально. Величины A_i, как следует из уравнения (18), будут мало изменяться, поскольку выражение, включающее D_1 в каждом A_i – это только один из членов суммы. Величины B_1 возможно изменятся еще меньше, так как любое изменение в них будет вызвано изменениями в A_i.

Таким образом, роль A_i заключается (предполагаем, что величина D_1 увеличилась) в небольшом сокращении числа всех запросов, которое компенсирует увеличение числа запросов в сеть 1. Следовательно, под A_i можно понимать некий конкурирующий параметр, сокращающий большинство запросов вследствие роста привлекательности одной сети. Знаменатель A_i также обычно используется как мера доступности, и можно сказать, что увеличение D_1 увеличивает доступность сети 1 для каждого пользователя корпоративной сети, хотя обычно мы будем пользоваться такой интерпретацией относительно изменений c_{ij}. Таким образом, этот анализ позволяет интерпретировать A_i в терминах конкурентной доступности сетевых ресурсов. Аналогичную роль играют величины B_j, которые связаны с основными изменениями в Q_i, а не в D_j. Изменение c_{ij} или несколько одновременных изменений Q_i и D_j приведет к сложному процессу перестройки A_i и B_j.

ВЫВОДЫ

Научная новизна. Проведенный анализ показал, что гравитационная модель имеет прочную основу и может быть применена для статистической оценки потоков данных в магистральных каналах корпоративных компьютерных сетей. Однако следует заметить, что весь анализ проводился для одноцелевых транзакций и для однородной группы запросов. Транзакции в компьютерных сетях не являются идентичными в том смысле, в котором идентичны частицы в физике, поэтому вряд ли можно ожидать, что для реальной корпоративной сети можно получить достаточно точные результаты моделирования. Тем не менее, рассмотренный в работе подход может быть использован для предварительной оценки загрузки магистральных каналов передачи данных, и даже дать хорошие результаты, если удастся классифицировать транзакции по цели и по типу передач так, чтобы добиться разумной однородности потоков данных.

Практическая значимость. Предложенный подход может быть использован для предварительной статистической оценки потоков данных в корпоративной компьютерной сети. Полученные статистические оценки, в свою очередь, целесообразно использовать при построении общих моделей потоков, предусматривающих различия по множеству типов запросов, а также учитывающих различия в типах коммуникаций, соединяющих различные сети с использованием маршрутизаторов и шлюзов.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. *Вишневский В. М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: «Техносфера», 2003. – 512 с.
2. *Иммельбаев Ш. С., Шмульян Б. Л.* Анализ стохастических коммуникационных систем с применением термодинамического подхода // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 5. – С. 26–31.
3. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
4. *Гуржий А. Н., Коряк С. Ф., Самсонов В. В., Скляров А. Я.* Контроль и управление корпоративными компьютерными сетями: инструментальные средства и технологии. – Харьков: «Компания СМИТ», 2003. – 664 с.
5. *Клейнрок Л.* Коммуникационные сети: Перев. с англ. – М.: «Наука», 1975. – 256 с.
6. *Скляров А. Я., Макрушан И. А.* Математическая модель синтеза иерархических структур систем управления с последовательным применением основных методов декомпозиции // АСУ и приборы автоматики. – 2005. – Вып. 131. – С.69–73.
7. *Советов Б. Я., Яковлев С. А.* Построение сетей интегрального обслуживания. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1990. – 332 с.
8. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике: Пер. с англ. под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова, с предисловием А. Н. Колмогорова. – М.: «Изд. иностранной литературы», 1963. – 829 с.
9. *Стратонович Р. Л.* Теория информации. – М.: Сов. радио, 1985. – 486 с.

Надійшла 23.03.06

Після доробки 3.07.06

У даній статті розглянуті питання моделювання транспортних комунікацій корпоративних комп'ютерних мереж. Пропонується два підходи рішення задачі: побудова моделі розподілу потоків даних на основі методів максимізації ентропії, а також використання гравіта-