УДК 004.738

Е.В. Саломатина

Топологическая модель информационно-управленческой сети

Исследования моделей трафика представляют одну из приоритетных задач в области телекоммуникаций. Происходящие процессы конвергенции не только предоставляют новые возможности для абонентов, но и влияют на подсистемы сети и способы их построения. Работа информационно-управленческих сетей (ИУС), относящихся к классу динамических сетей, основана на организации многоуровневого взаимодействия между множеством её элементов. В статье исследуются вопросы построения оптимальной топологии ИУС, позволяющей сократить трафик за счет управления информационными потоками.

Ключевые слова: динамические графы, информационно-управленческая сеть, тензорное исчисление.
doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-87-91

Актуальность

Внедрение цифрового стандарта является общемировой тенденцией развития телекоммуникаций и открывает большие возможности для предоставления дополнительных инфокоммуникационных (ИК) услуг населению. Темпы, глубина и масштаб технологических изменений определяют появление новых принципов передачи, распределения и обработки информации. Цифровые алгоритмы расширяют спектр предоставляемых сервисов и услуг, предлагают аудио и видео высокого качества и одновременно снижают потребности в радиочастотном спектре. Процессы конвергенции сетей связи представляют принципиально новые возможности для абонента, вместе с тем изменяются подсистемы сети и способы их построения, экспоненциально возрастает сложность управления сетью, происходит реструктуризация трафика пользователей. Все это обостряет проблемы управления информационными потоками в сетях передачи данных. С одной стороны, улучшение качества обслуживания передаваемых данных требует повышения требований к задержкам передачи, надежности и отказоустойчивости при изменяющейся интенсивности потоков данных. С другой стороны, повышение экономических показателей работы операторов связи требует увеличения загрузки ресурсов сети. Разумный компромисс может быть найден путем построения рациональной топологии сети, учитывающей множественность требований.

Формальное представление структуры информационно-управленческой сети

При изучении сложных структурно-изменяющихся сетей различной природы и происхождения широко используется понятие динамических сетей (Dynamic networks). Любая сеть при наличии принципиальных отличий в структуре и поведении обладает свойствами, которые отражают специфику строения, характерную для всех сетей, – состоит из некоторого конечного числа узлов, соединенных между собой связями. Структура связей между узлами задаёт топологию сети. Динамические сети постоянно подвергаются изменениям в своей структуре или атрибутах. Топология современной сети не может быть строго фиксированной, более того, она вынуждена претерпевать изменения в силу различных обстоятельств, например увеличения количества абонентов в сети. В [1] высказывается мнение о важности динамических процессов, происходящих в узлах и связях. Процессы эволюции структуры и динамики узлов и связей взаимосвязаны. Особенности топологии связей непосредственно влияют на коллективную динамику узлов, а совместное изменение состояний может привести к изменению структуры сети.

Динамический граф как модель динамической сети представляет собой последовательность «классических» графов, не имеющих параллельных ребер и петель, переход между которыми описывается различными теоретико-графовыми операциями [2, 3]. Возможные изменения включают в себя вставку и удаление вершин (объектов), вставку и удаление ребер (связей) и изменение атрибутов. Последовательный процесс перехода графа из одного состояния в другое в различные моменты времени описывается динамическим процессом. При этом объектом исследования в рассматриваемой динамической задаче служит не движение по графу, а изменение графа в целом. В работах [4–6] для таких объектов используется понятие «графодинамическая система».

К данному классу систем относятся информационно-управленческие сети (ИУС), работа которых основана на организации многоуровневого взаимодействия между множеством её элементов [7–10]. Современная ИУС – это сложная территориальная распределённая человеко-машинная система, состоящая из большого, но конечного множества элементов, включающая широкую номенклатуру инфокоммуникационных средств. В основе описания ИУС лежит $x(t)$ – граф, существующий в момент времени t [5], при этом закон изменения графа во времени может быть записан в форме некоторого рекуррентного процесса

$$x(x+1) = F(x(t)),$$

где F – некоторый оператор над графом, преобразующий граф, наблюдаемый в момент t, в граф, наблюдаемый в момент времени $t+1$.

В информационно-управляющих системах выделяется жесткая иерархия вершин, включающая центр управления $C_{\mu S\alpha}$, промежуточные уровни управления и абонентские вершины АП$_i$, являющиеся объектами управления.

Для описания ИУС при помощи модели будем считать элементы ИУС (пункты сбора, трансляции, ретрансляции и приема информации) вершинами вводимого графа. Каналы передачи данных, используемые в исследуемой ИУС, будем отождествлять с ребрами графа. Поскольку рассматриваются не только полностью дуплексные, но и полудуплексные и симплексные каналы, то направление движения информации по ним будет описываться ориентацией ребер графа. Под преобразованием графа ИУС понимается изменение топологии графа как в плане связности вершин, так и в плане изменения метрики весов, приписанных ребрам графа.

Как на ребрах, так и на вершинах графа может быть введена одна или несколько метрик: пропускная способность канала, надежность передачи данных (измеряемую в допустимом количестве ошибок на фиксированный объем данных), а также временные задержки, возникающие при передаче сообщений по каналу. Введенную метрику для каналов, соединяющих элементы АП$_i$ и АП$_j$, будем описывать числовым значением a_{ij}. В случае если две вершины не связаны непосредственно, значение этой величины устанавливается в 0. Совокупность весов ребер графа наложим на матрицу связанности ориентированного графа. В результате получим новую матрицу связанности с числовыми коэффициентами:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}. \tag{1}$$

При оптимизации структуры ИУС требуется найти оптимальную топологию ребер связности графа, при которой целевая функция оптимизации – общая стоимость каналов связи принимает глобальный экстремум при наложенных ограничениях: минимально допустимые значения пропускной способности путей от источника информации к абонентской вершине и максимально допустимое время задержки при пересылке данных.

Использование тензорного исчисления для построения оптимальной топологической модели информационно-управленческой сети

На множестве графов, моделирующих структуру ИУС, вводится метрика в виде матрицы весовых коэффициентов, характеризующих стоимость передачи информации от вершины АП$_i$, к вершине АП$_j$. Обозначим эту матрицу через **S**. Для обозначения множества весовых коэффициентов, характеризующих пропускную способность канала передачи данных от вершины АП$_i$ к вершине АП$_j$ введем обозначение **P**. И, наконец, для обозначения максимально возможной задержки в передаче данных введем обозначение **D**. Все эти матрицы являются разреженными.

Кроме простой метрики, на графе вводится сложная метрика, являющаяся композицией всех перечисленных значений с некоторыми весовыми коэффициентами:

$$f_1 \times \mathbf{S} + f_2 \times P + f_3 \times \mathbf{D}. \tag{2}$$

Для преобразования структуры графа вводится оператор F, осуществляющий переход от графа первоначальной структуры к графу с новой структурой. При этом преобразование является инвариантным, если сохраняется достижимость для всех абонентских вершин графа. В этом случае задача оптимизации сводится к последовательному применению множества операторов инвариантного преобразования.

Обозначим вектор вершин АП$_i$ тензорным объектом $\mathbf{y}^{\alpha}$. Для описания дуг введем тензорный объект $\mathbf{x}^{\beta}$, каждый элемент которого характеризует информационную связь между i и j вершинами графа. Этот векторный объект имеет размерность, равную количеству существующих (непустых) дуг графа.

Будем задавать топологию сети матрицей соединений вершин, где

$$\mathbf{J}^i_j = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases}$$

если из вершины i в вершину j есть прямая связь либо прямой связи нет.

Дополнительной к этой матрице будет матрица связности дуг и вершин графа. Эта матрица описывает соединение i дуги с j через вершину. Тензор второго ранга, описывающий связь вершин, будем обозначать $\mathbf{J}^{\beta}{}_{\beta}$. При этом

$$\mathbf{B}^i_j = \begin{cases} 1, \\ 1, \\ 0, \end{cases}$$

в случае если дуга i выходит из вершины j, или дуга i входит в вершину j, или связь между дугой и вершиной отсутствует соответственно. Эта матрица состоит из нулей, единиц и минус единиц и при этом слабо заполнена. Будем описывать этой матрицей тензор $\mathbf{B}^{\alpha}_{\beta}$, задающий преобразования топологии ИУС.

Объем информации, приходящий в текущий момент времени в каждую вершину i, будем обозначать как векторный объект $\mathbf{y}_{\alpha}$.

В тензорной модели ИУС при преобразованиях структуры сети инвариантными остаются количество вершин и потоки информации, входящие и выходящие из каждой вершины. Это условие записывается как

$$\sum_{i=1}^{N} f_i x_i = \text{const}, \tag{3}$$

где N равно количеству дуг, связанных с вершиной, причем для выходящих дуг $f_i = -1$, а для входящих $f_i = 1$.

В тензорной форме равенство (3) записывается как

$$\mathbf{B}^{\alpha}_{\beta}\, \mathbf{x}^{\beta} = \mathbf{y}_{\alpha} = \text{const} \tag{4}$$

и задает инвариантное условие для группы допустимых графодинамических преобразований ИУС.

Для описания функции преобразования ИУС введем тензор $\mathbf{F}_{\alpha}^{\gamma}$, который характеризует переход от одной топологической структуры ИУС $\mathbf{B}_{\beta}^{\alpha}$ к другой структуре $\mathbf{B}_{\beta}^{\alpha}$:

$$\mathbf{B}_{\beta}^{\gamma} = \mathbf{F}_{\alpha}^{\gamma}\,\mathbf{B}_{\beta}^{\alpha}. \qquad (5)$$

При этом инвариантность условия (4) сохраняется. Количество дуг и соответственно размерность матрицы **B** могут изменяться. Класс структурных преобразований сети с указанным инвариантом обладает свойствами алгебраической группы.

Для сравнения различных вариантов конфигурации ИУС, относящихся к одному классу инвариантности, необходимо ввести целевую функцию. Кроме того, каждое ребро графа имеет числовые значения, характеризующие пропускную способность канала, его надежность, стоимость его создания и эксплуатации. Для каждого из этих наборов значений введем свой тензорный объект: $\mathbf{Z}_{\alpha}$ – стоимость канала связи, выраженная в денежных единицах (включая стоимость эксплуатации и начальную стоимость, разделенную на срок эксплуатации); $\mathbf{P}_{\alpha}$ – пропускная способность канала (выраженная в бит/с); $\mathbf{D}_{\alpha}$ – максимально возможная задержка (выраженная в секундах) при передаче информации по каналу, включая все задержки в аппаратуре связи и в канале данных.

В тензорной форме функция (2) будет записана как линейная комбинация трех тензоров, характеризующих метрику канала, умноженная на тензор связанности, отражающий топологическую структуру сети:

$$\mathbf{G}(\mathbf{B}) = \mathbf{B}_{\beta}^{\alpha}(f_1\mathbf{Z}_{\alpha} + f_2\mathbf{P}_{\alpha} + f_3\mathbf{D}_{\alpha})\mathbf{x}^{\beta}. \qquad (6)$$

В функции (6) также участвует вектор $\mathbf{x}^{\beta}$, отражающий текущий объем информации, поступающей абоненту АП$_i$. Для источников информации значение этого параметра имеет отрицательное значение. Такой показатель, как надежность канала, измеряемая в количестве ошибок на определенный объем данных, частично выражается через задержку, требуемую для повторной передачи данных или корректирующей информации.

Основной особенностью класса систем S_{α} типа ИУС является особое положение вершин типа $C_{\mu S_{\alpha}}$ (асимметрично относительно остальных вершин типа АП$_i$). Анализ любой сложной сети можно существенно упростить, проведя ее декомпозицию на подсети таким образом, чтобы в каждой подсети была только одна вершина типа $C_{\mu S_{\alpha}}$. Алгоритм такой декомпозиции прост и состоит в том, что для каждой вершины типа $C_{\mu S_{\alpha}}$ определяется множество АП$_i$, которое с ней связано. После этого данная подсеть выделяется в виде отдельного графа, в котором присутствует только один центр и все его абонентские пункты. Если один АП$_i$ связан сразу с несколькими центрами, то эта вершина АП$_i$ входит в несколько подсетей.

После проведения декомпозиции можно рассматривать простой класс сетей с единственным информационным центром. Все утверждения, доказанные для такого класса сетей, будут справедливы и для общей сети, поскольку результирующая сеть является линейной комбинацией подсетей.

Оптимальная топология ИУС – та, при которой все объекты ИУС оказываются в любой момент времени симметричными относительно любого центра $C_{\mu S_{\alpha}}$ и абонента АП$_i$ (рис. 1).

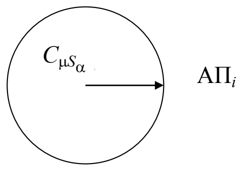

Рис. 1. Иллюстрация к оптимизации топологии ИУС

Произведем декомпозицию сети на подсети, каждая из которых имеет единственный центр. Обозначим каждую сеть как S_{α}, при этом результирующая сеть S будет объединением всех составляющих ее подсетей

$$S = S_1 \cup S_2 \cup \ldots \cup S_{\alpha}. \qquad (7)$$

Введем на каждой из подсетей метрику, определяющую расстояние между каждой из пар вершин в соответствии с (6). Подставим в (6) значения топологической матрицы для симметричного случая. Получим

$$\mathbf{B}_1^{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & \ldots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ldots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ldots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \end{pmatrix}.$$

Раскроем выражение (6) в виде суммы

$$\mathbf{G}(\mathbf{B}_1) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} b_{ij}(f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) =$$

$$= \sum_{i=2}^{N}(f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) - (f_1 s_1 + f_2 p_2 + f_3 d_3).$$

Для любого другого случая выражение будет иметь вид

$$\mathbf{G}(\mathbf{B}_2) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} b_{ij}(f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) = \sum_{i=1}^{N} b_{ij}^{\,2} +$$

$$+ \sum_{i=2}^{N}(f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) + \sum_{j=1}^{K}(f_1 s_j + f_2 p_j + f_3 d_j).$$

В случае несимметричной конфигурации сети с одним информационным центром информация, предназначенная для i-й вершины, проходит не по одной дуге, а по пути, состоящему из последовательности дуг. Для дуги, входящей в несколько путей, составляющие элементы суммируются. Вычтем значения целевой функции для симметричного случая из общего случая:

$$\mathbf{G}(\mathbf{B}_2)-\mathbf{G}(\mathbf{B}_1)=\sum_{i=2}^{N}(f_1 s_i+f_2 p_i+f_3 d_i)-$$
$$-(f_1 s_1+f_2 p_1+f_3 d_1)-\sum_{i=2}^{L}(f_1 s_i+f_2 p_i+f_3 d_i)-$$
$$-\sum_{j=1}^{K}(f_1 s_j+f_2 p_j+f_3 d_j)=\sum_{i=2}^{N}(f_1 s_i+f_2 p_i+f_3 d_i)+\sum_{i=1}^{N-1} b_{ij}{}^2.$$

Поскольку в итоговом выражении все составляющие положительны, следовательно, исходное выражение всегда будет больше нуля:

$\mathbf{G}(\mathbf{B}_2) - \mathbf{G}(\mathbf{B}_1) > 0$, тогда $\mathbf{G}(\mathbf{B}_2) > \mathbf{G}(\mathbf{B}_1)$.

Это значит, что значение целевой функции на любой несимметричной S_α всегда больше значения целевой функции на симметричной S_α и, следовательно, $\mathbf{G}(\mathbf{B}_1)$ = min. Поэтому значение целевой функции на симметричной S_α всегда минимально, следовательно, построенная таким образом сеть оптимальна в смысле комплексного критерия затрат, задержек и пропускной способности каналов.

Реализация утверждения способствует созданию возможностей к оптимизации объема передаваемой информации в сети S_α.

Поскольку одной из компонент оптимизации ИУС является объем передаваемой информации, а зависимость от различных составляющих является линейной композицией, можно провести линейную декомпозицию целевой функции по составляющим компонентам (стоимостному, временному и объемному). В силу свойства неотрицательности коэффициентов f_i можно утверждать, что полученная в результате декомпозиции объемная компонента будет монотонно убывать при преобразовании сети от менее централизованной к более централизованной и симметричной относительно центра.

В соответствии с принципом декомпозиции сетей ИУС сеть ИУС легко разбивается на подсети с единственным информационным центром. Каждая из независимых подсетей может быть как оптимальной, так и неоптимальной. Но если все подсети оптимальны, то и результирующая сеть также оптимальна, что непосредственно следует из линейности процедуры объединения подсетей.

Выводы

В информационно-управляющих системах (ИУС) выделяется жесткая иерархия вершин, включающая центр управления $C_{\mu S_\alpha}$, промежуточные уровни управления и абонентские вершины АП$_i$, являющиеся объектами управления.

Анализ сети значительно упрощает декомпозиция, где подсеть выделяется в виде отдельного графа, в котором присутствуют только один центр типа $C_{\mu S\alpha}$ и множество абонентских пунктов АП$_i$, которые с ним связаны.

Поскольку результирующая сеть является линейной комбинацией подсетей, после проведения декомпозиции все утверждения, доказанные для класса сетей с единственным информационным центром, будут справедливы и для общей сети.

В оптимальной топологии ИУС все ее объекты оказываются в любой момент времени симметричными относительно любого центра $C_{\mu S_\alpha}$ и абонента АП$_i$.

Любое продвижение S_α в сторону оптимальной топологии сопровождается уменьшением объема передаваемой в ИУС информации.

Сети ИУС могут иметь отдельные участки в сети, где реализуются условия оптимальной топологии.

В ИУС имеется предельное значение отрезка времени, в течение которого абонент АП$_i$ может находиться вне какой-либо, хотя бы одной ИУС.

Благодарности

Автор благодарит академика Национальной академии наук Республики Армения, заслуженного работника связи РФ, д.т.н. В.К. Сарьяна за ценные обсуждения и полезные советы по теме работы.

Литература

1. Масленников О.В. Адаптивные динамические сети / О.В. Масленников, В.И. Некоркин // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 7. – С. 745–756.

2. Оре О. Теория графов. – 2-е изд. – М.: Наука, 1980. – 336 с.

3. Кочкаров А.А. Структурная динамика: свойства и количественные характеристики предфрактальных графов. – М.: Вега-Инфо, 2012. – 120 с.

4. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики). I / М.А. Айзерман, Л.А. Гусев, С.В. Петров, И.М. Смирнова // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 7. – С. 136–151.

5. Тененбаум Л.А. Исследование одного класса графодинамических систем // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 10. – С. 153–173.

6. Затуливетер Ю.С. Графодинамические системы с сетецентрическим управлением в математически однородном поле компьютерной информации / Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко // Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН, 2010. – № 30.1. – С. 567–604.

7. Сарьян В.К. Массовые информационно-управленческие сети – основа инфокоммуникационной среды будущего // IV Междунар. отраслевая науч.-техн. конф. «Технологии информационного общества»: Программа научно-технических секций. – М.: МТУСИ, 2010. – С. 6.

8. Сарьян В.К. О влиянии типовых информационных процессов на эволюцию информационно-управленческих сетей /В.К. Сарьян, Д.В. Дубнов // Труды НИИР. – 2010. – № 3. – С. 4–10.

9. Беляков К.О. Перспективы использования защищенных информационно-управленческих сетей для информатизации образования / К.О. Беляков, Р.В. Мещеряков // Электронные средства и системы управления: докл. межд. научн.-практ. конф. (Томск, 8–10 нояб. 2012 г.). — Томск: В-Спектр, 2012. – Ч. 2. – С. 32–34.

10. Особенности реализации социальных технологий средствами современных инфокоммуникационных систем / В.К. Сарьян, Е.В. Саломатина, А.П. Назаренко, Н.А. Сущенко // Труды НИИР. – 2014. – № 3. – С. 33–37.

Саломатина Елена Васильевна
Аспирантка базовой каф. электромагнитной
совместимости и управления радиочастотным спектром
Московского технического университета
связи и информатики (МТУСИ) при ФГУП НИИР
Тел.: +3-737-782-61-81
Эл. почта: salolew@spsu.ru

Salomatina E.V.
Topological model of information control network

The studies of traffic patterns represent one of the priority tasks in the field of telecommunications. The occurring convergence processes not only provide new opportunities for subscribers, but also affect the network subsystems and the ways of their construction. The work of information control networks (ICN), belonging to the class of dynamic networks, is based on the organization of a multilevel interaction between the set of its elements. The article explores the issues of constructing the optimal topology of ICN, which allows to reduce traffic due to the management of information flows.
Keywords: dynamic graphs, information control networking, tensor calculus.