

Одна задача структурной оптимизации сетей передачи данных *

А. М. Кальней¹, А. С. Родионов^{1,2}

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск)

² Сибирский гос. унив. телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы анализа и структурной оптимизации многоуровневых сетей передачи данных с использованием модели случайной гиперсети. Утверждается, что основным уровнем, подверженным разрушениям под воздействием внешней среды и влияющим на работоспособность сети в целом, является физический уровень, но в структурном плане физические разрушения прежде всего сказываются на уровне канальном. В свою очередь, отказы на канальном уровне влияют на организацию работы сетевого и вышестоящих уровней, в частности, требуют перераспределения потоков, в том числе перестроения виртуальных каналов.

Приводится краткий обзор моделей многоуровневых сетей, используемых для анализа и структурной оптимизации сетей передачи данных различного назначения (в частности, сенсорных сетей мониторинга), даётся описание случайной гиперсети и обсуждаются некоторые задачи повышения надёжности функционирования сетей на сетевом уровне при возможных отказах каналов и узлов сети, т.е. нарушениях её работы на канальном уровне.

В качестве показателей надёжности сетевого уровня сети рассматриваются возможность (вероятность) передачи данных между парой узлов в принципе либо по установленным виртуальным каналам и математическое ожидание числа узлов, способных передать данные в центральный узел.

В качестве целей структурной оптимизации рассматриваются наилучшая укладка виртуальных каналов в известную структуру канальной сети и размещение базовых станций в узлах сети, связь которых с центральным узлом считается надёжной.

Ключевые слова: надёжность сети, гиперсети, структурная оптимизация.

Для цитирования: Кальней А. М., Родионов А. С. Одна задача структурной оптимизации сетей передачи данных // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 3. С. 45–56.

<https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-3-45-56>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Кальней А. М., Родионов А. С., 2024

Статья поступила в редакцию 22.01.2024;
переработанный вариант – 12.03.2024;
принята к публикации 14.03.2024.

1. Введение

Сети связи вообще и сети передачи данных в частности относятся к классу многоуровневых сетей. Одной из наиболее известных моделей таких сетей является модель взаимодействия

* Данные работы выполнены по государственному контракту с ИВМиМГ СО РАН № 0251-2022-0005.

открытых систем OSI (Open Systems Interconnection). Имеем решающее влияние на функционирование таких сетей уровня канального, причины неполадок которого чаще всего обусловлены воздействием внешней среды на уровень физический. Также не рассматриваем и уровни выше сетевого, надёжность которых определяется аппаратно-программной реализацией соответствующих протоколов и работа которых возможна только в условиях достаточного уровня надёжности канального и сетевого уровней.

Как в связи с рассмотрением цифровых сетей, так и сетей другой природы (транспортных, социальных, информационных и др.) возникает потребность построения адекватных моделей, их описывающих. В работе [1] дан критический обзор некоторых моделей. В частности, для телекоммуникационных сетей исследованы следующие модели:

- Сэндвич-графы [2].
- Модель многоуровневой сети, основанной на ITU-T G.805 [3].
- Модель для проектирования многоуровневой структуры WLAN [4].
- Многоуровневые сложные сети (LCN) [5].
- Модель для двухуровневой SDH/WDM-сети [6].
- Модель для двухуровневой оптической сети [7].
- Многослойная сеть [8].
- Гиперсеть [9].

Основной задачей любого информационного управления в сети является анализ поведения сети и моделирование вариантов ее развития на основе реальной информации. Чем сложнее топология и конфигурация сети, тем больше информации требуется для проведения ее адекватного анализа. При анализе или проектировании больших сетей мониторинга часто возникает проблема расположения контрольных устройств (b-узлов) для сбора информации. После некоторой предварительной обработки или напрямую b-узлы передают информацию центральному узлу (с-узлу) по надежным каналам. Одним из основных показателей качества таких сетей является размер территории, находящейся под надежным контролем, которую можно оценить с помощью математического ожидания количества узлов, связанных с одним специальным узлом MENC (от англ. Mathematical expectation of a number of nodes that are connected with one special node).

Остальная часть статьи организована следующим образом: во второй главе рассматриваются вопросы применимости исследованных моделей для анализа и оптимизации телекоммуникационных сетей, в третьей главе вводится модель гиперсети, в четвёртой – описывается задача структурной оптимизации многоуровневой сети, в пятой – приводится пример.

2. Применимость моделей для телекоммуникационных сетей

Широко используемая на практике модель графов не подходит для моделирования даже простейшей двухуровневой сети, что показывает следующий пример. Пусть имеется кабельная сеть, представленная графом G_1 , и пусть некоторая сеть, осуществляющая транспортировку данных, лежит в нём. Эта сеть может быть представлена графом G_2 , который необязательно совпадает с G_1 . Назовём G_1 физической сетью, в то время как G_2 назовём логической сетью. Вложение G_2 в G_1 может быть сделано различными способами. Имеется некоторое отображение связей G_2 в пути, состоящие из связей G_1 . Очевидно, выход из строя или изменение пропускной способности ребра графа G_1 может привести к выходу из строя или изменению пропускной способности нескольких связей в G_2 или не изменить ни одну из них. Поэтому для анализа многоуровневой сети необходима более сложная модель, чем граф.

Относительно недавно были проведены серьёзные исследования моделей многоуровневых сложных сетей, обобщения терминологии и инструментов в этой области [8, 10, 11]. В работе

[8] была введена модель многослойной сети, которая может использоваться для представления большинства типов сложных систем (например, в социологии, эпидемиологии, биомедицине и т.д.), которые состоят из нескольких сетей или включают несопоставимые и/или множественные взаимодействия между объектами. Более подробное описание этой модели и логики её построения приведено в работе [1], также в этой работе приведено сравнение с моделью гипер-сети, показавшее большую универсальность последней модели. Ниже даётся краткое описание упомянутых моделей многоуровневых сетей.

2.1. Модель многоуровневой сети, основанной на ITU-T G.805

В работе [3] рассматривается задача маршрутизации в сети передачи данных с коммутацией каналов с наличием нескольких логических слоёв (разных технологий) и различных интерфейсов (с возможностью адаптации сигнала той или иной технологии). В таких сетях естественным образом возникает задача проверки валидности устанавливаемого пути между узлами. На рис. 1 из работы представлен пример такой сети, где каждый узел является национальной исследовательской, образовательной сетью, участвующей в глобальном интегрированном фонде Lambda. Связи между ними могут быть: соединение Gigabit Ethernet (GE), соединения OC-192, основанные на технологии SONET (Synchronous Optical Networking) и передающие 192 канала STS (Synchronous Transport Signal).

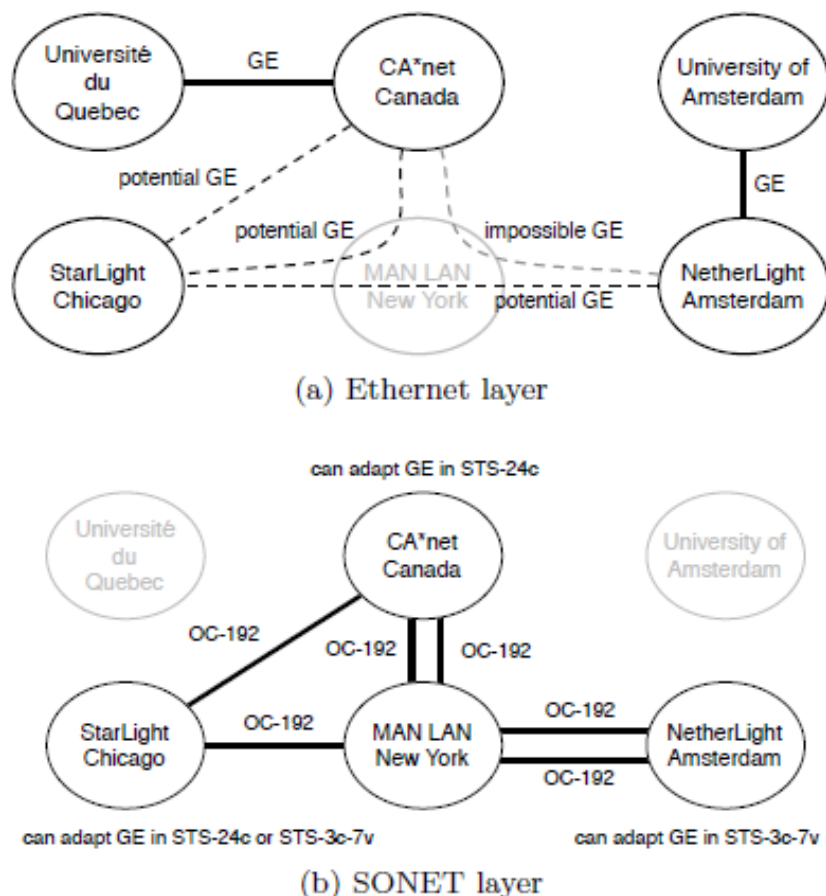


Рис. 1. Пример двухуровневой сети с коммутацией каналов

В работе показано, что из-за различий в возможности адаптации соединения GE невозможно установление соединения по кратчайшему пути между университетом Квебека (Université du

Quebec) и университетом Амстердама (University of Amsterdam) через MAN (Metropolitan Area Network) LAN (Local Area Network) New York. Как заключают авторы статьи, многоуровневый алгоритм поиска пути должен иметь информацию не только об уровнях и адаптациях своих непосредственных соседей, но и об уровнях и адаптациях доменов, расположенных дальше по пути. Для моделирования таких сетей было предложено использовать рекомендации ITU-T (International Telecommunication Union — Telecommunication sector) G.805 [12]. Основываясь на данных рекомендациях, было проведено отображение элементов сети в функциональные элементы, отображённые в табл. 1. Авторами была введена простая алгебра для нахождения валидного пути между двумя узлами.

Т а б л и ц а 1. Отображение элементов сети с коммутацией каналов в функциональные элементы

Элемент сети	Функциональные элементы
Домен	Подсеть(и)
Устройство	Матрица (Подсеть)
Интерфейс	Точка(и) подключения и функция(и) адаптации
Связь	Соединение по связи

Однако применительно к задаче анализа надёжности многоуровневых сетей мониторинга различной природы данная модель не может быть применена, поскольку она ограничивается только сетями с коммутацией каналов.

2.2. Модели для прикладных задач

Зачастую при решении конкретной прикладной задачи исследователи создают частные модели для их решения. В качестве примера таких задач можно привести проектирование многоуровневой структуры WLAN (Wireless Local Area Network) [4], двухуровневой сети SDH/WDM (Synchronous Digital Hierarchy/Wavelength-Division Multiplexing) [6], разработку схемы защиты (восстановления) двухуровневой оптической сети [7].

В задаче проектирования многоуровневой структуры WLAN решаются проблемы качества обслуживания, безопасности и мобильности (возможности перемещения пользователей между областями) сети. Для решения данной задачи используется межуровневое проектирование в сети, основанной на протоколе TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), состоящей из пяти уровней: прикладной уровень, транспортный уровень, сетевой уровень, уровень канала передачи данных и физический уровень. Для достижения каждой поставленной задачи вводятся вертикальные связи между уровнями сети.

При проектировании двухуровневой SDH/WDM-сети ставятся цели найти минимальную стоимость установки аппаратного оборудования каналов и узлов на обоих сетевых уровнях, чтобы требования к трафику могли быть реализованы посредством регулируемой (процесс группировки множества мелких телекоммуникационных потоков в более крупные) и устойчивой маршрутизации. Для решения данной задачи вводится формулировка смешанно-целочисленного программирования для предопределенного набора допустимых логических каналов, которая учитывает множество практических ограничений, включая аппаратное обеспечение узла, несколько скоростей передачи данных и устойчивость к отказам одного физического узла или канала.

В двухуровневой оптической сети преобладают следующие два типа отказов: сбои на оптическом транспортном уровне, такие как обрыв волокна или кабеля или отказ передатчика, и сбои на пакетном уровне: неправильная конфигурация, сбой процессора или линейной карты, сбой питания или сбой источника питания. Используя для пакетного уровня сеть на основе протокола IP/MPLS (Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching), а также известные механизмы

для восстановления элементов сети как на оптическом, так и на пакетном уровне, достигаются задачи повышения эффективности сети в целом. Для изучения предложенного подхода была разработана модель смешанно-целочисленного программирования, решение которого минимизирует общую стоимость двухуровневой оптической сети для защиты трафика от отказов.

2.3. Многоуровневые сложные сети (LCN)

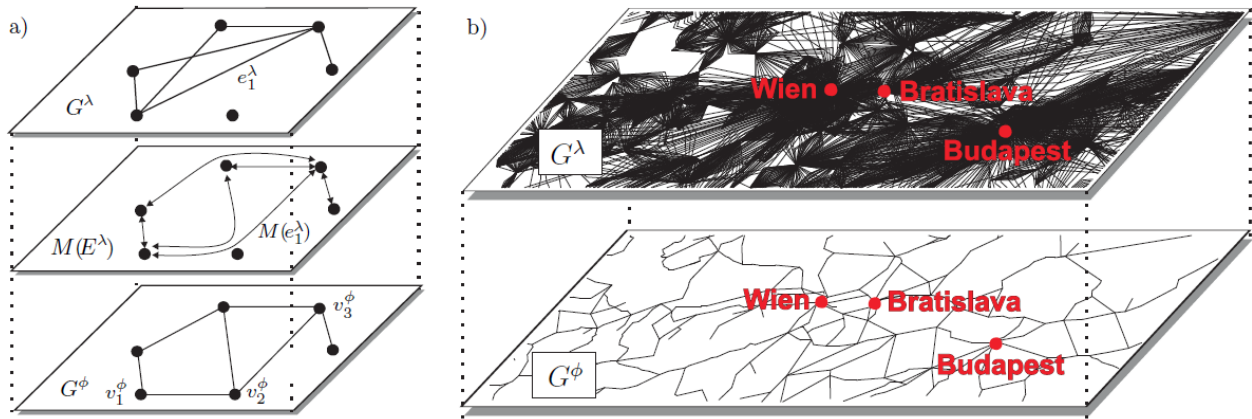


Рис. 2. (а) Иллюстрация двухуровневой модели. Логический граф G^λ отображается в физический граф G^ϕ по отображению $M(E^\lambda)$. В этом примере логическое ребро e_1^λ отображается в граф G^ϕ как путь $M(e_1^\lambda) = (v_1^\phi), v_2^\phi, v_3^\phi$. Предполагается, что G^λ – невзвешенный, нагрузки трёх указанных узлов равны: $l(v_1^\phi) = 3$, $l(v_2^\phi) = 2$, $l(v_3^\phi) = 4$. (б) Часть логических и физических графов для набора данных Европы. Здесь интенсивности трафика (веса) обозначаются мультиребрами логического графа.

Для оценки распределения трафика вводится двухуровневая модель, состоящая из физического и логического уровней [5]. Во многом эта модель схожа с вводимой в следующей главе моделью гиперсети. Как и для гиперсети, вводится физический граф (первичная сеть в терминологии гиперсети) $G^\phi = (V^\phi, E^\phi)$ и логический граф (вторичная сеть в терминологии гиперсети) $G^\lambda = (V^\lambda, E^\lambda)$. Как и для простой гиперсети, предполагается, что вершины физического и логического графов совпадают: $N = V^\phi = V^\lambda$. Каждое логическое ребро $e^\lambda = (u^\lambda, v^\lambda)$ отображается в маршрут на физическом графе $M(e^\lambda) \subset G^\phi$. Узлам и ребрам могут быть присвоены веса, обозначенные $w(\cdot)$, причем $w = 1$ для невзвешенных графов. Нагрузкой l узла v^ϕ является сумма всех весов логических рёбер, чьи пути проходят через v^ϕ :

$$l(v^\phi) = \sum_{e^\lambda: v^\phi \in M(e^\lambda)} w(e^\lambda). \tag{1}$$

На картинке 2, взятой из статьи (рис. 2б), представлен пример двухуровневой транспортной сети (примерами таких сетей могут быть сети энергосистемы, железнодорожные сети, дорожные сети, городские системы общественного транспорта). Также на картинке можно видеть способ укладки логических рёбер в физический граф.

Однако, несмотря на схожесть этой модели с моделью гиперсети, она учитывает связи только соседних уровней (физического и логического). В более сложных сетях может быть больше двух уровней, на одном уровне может быть несколько сетей, а вершины могут не совпадать. Для моделирования таких сетей необходимо использовать более сложную модель S-гиперсети [13].

3. Модель гиперсети

Перейдём к описанию гиперсетевых моделей. Двухуровневая, или простая, гиперсеть $H = (X, V, R; P, F, W)$ состоит из следующих объектов (см. рис. 3, заимствованный из [14]):

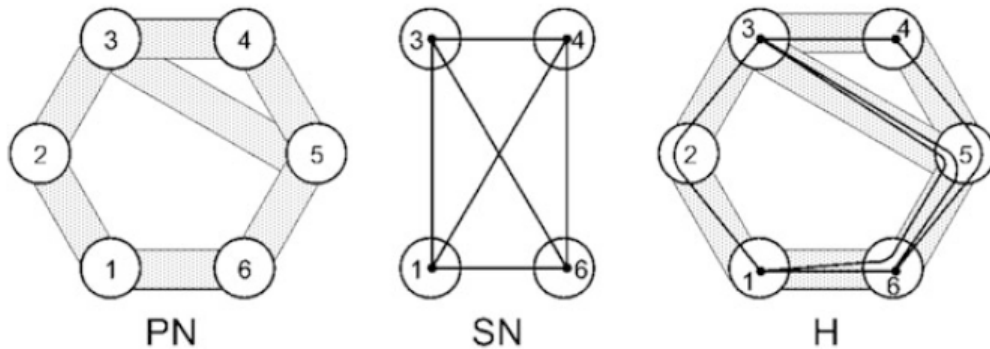


Рис. 3. Иллюстрация к определению гиперсети: PN – это первичная сеть; тёмные вершины $\{1, 3, 4, 6\}$ из набора вершин относятся к SN ; SN – это вторичная сеть (в нашем случае является полным графом); H – это гиперсеть (SN отображается в PN)

$X = (x_1, \dots, x_n)$ – набор вершин;

$V = (v_1, \dots, v_m)$ – набор ветвей (рёбер графа первичной сети);

$R = (r_1, \dots, r_g)$ – набор рёбер (рёбер графа вторичной сети);

$P : V \rightarrow X \times X$ – отображение, которое определяет граф $PN = (X, V)$, который называется первичной сетью;

$W : R \rightarrow X \times X$ – отображение, которое определяет граф $SN = (X, R)$, который называется вторичной сетью;

$F : R \rightarrow 2^V$ – отображение рёбер в маршруты PN .

Вводя множественное вложение вторичных сетей в первичную сеть, вложение вторичных сетей друг в друга, отображение нескольких вершин вторичной сети в узел первичной, приходим к формальному определению S-гиперсети [13].

4. Структурная оптимизация гиперсети

Возможны различные разрушения гиперсети, они изображены на рис. 4, заимствованном из [14]. В текущей работе используются варианты I, III и IV для удаления узлов, ветвей и рёбер соответственно.

Первым рассматриваемым показателем надёжности будет вероятность соединения пары узлов во вторичной сети R_{st} . Выбранные узлы обозначаются как s, t .

Одним из возможных аддитивных показателей, который можно получить из этого показателя, является $MENC$, который можно рассчитать по формуле:

$$\sum_{1 \leq i \leq n} R_{CNx_i}(H).$$

Центральный узел помечен как CN . Этот показатель используется как характеристика качества сети мониторинга с точки зрения охвата контролируемой территории.

В работе [15] был представлен метод факторизации для вычисления парной связности R_{st} , были описаны различные приёмы по ускорению его вычисления. При вычислении $MENC$ мы получаем кумулятивные границы [16], которые могут помочь остановить вычисления, когда требуемое значение $MENC$ больше верхней границы или меньше нижней границы.

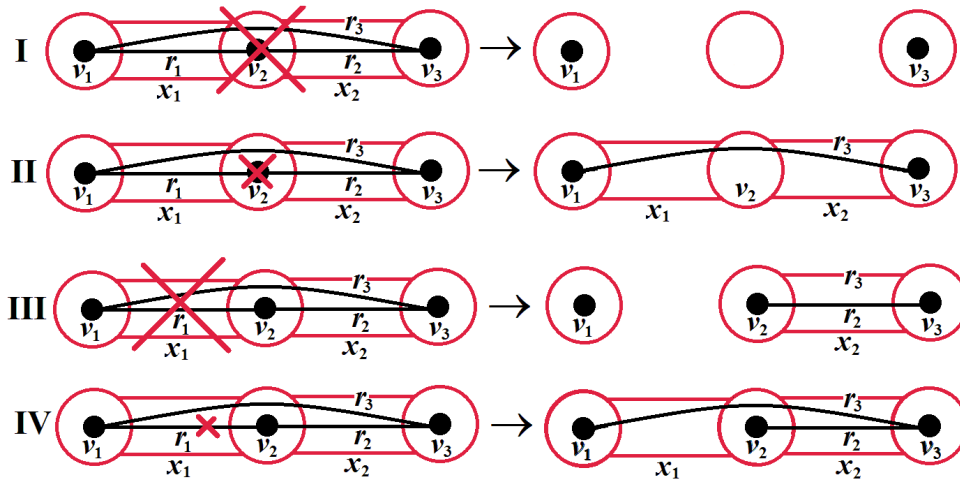


Рис. 4. Возможные случаи разрушения гиперсети

Рассмотрена классическая модель «затраты – надежность»:

$$\sum_{j \in 1, \dots, m} c_j y_j \rightarrow \min_{y_j} \tag{2}$$

$$MENC \geq R, \tag{3}$$

где c_j – стоимость размещения b -узла в ветви v_j ; y_j – флаг выбранной ветви v_j ; R – требуемое значение надежности. Если все затраты равны, то получаем следующую задачу:

$$\sum_{j \in 1, \dots, m} y_j \rightarrow \min_{y_j}$$

$$MENC \geq R.$$

Каждое размещение b -узла на ветви изменяет элементы гиперсети, как показано на рис. 5. Сначала мы получаем b -узел, который разделяет ветвь и создает новые рёбра во вторичной сети. Затем соединяем его надежной ветвью с c -узлом.

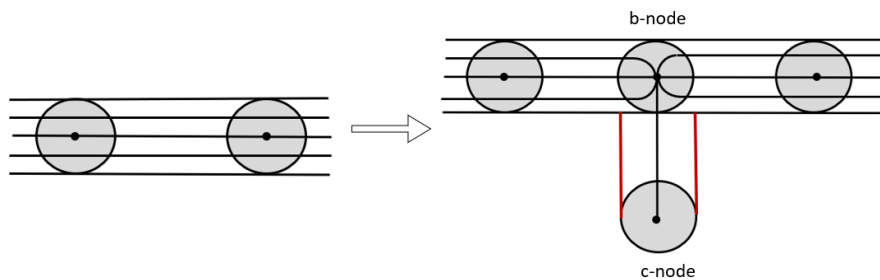


Рис. 5. b -узел на ветви

Задача точного расчета вероятности связности случайной сети с ненадежными элементами относится к классу NP-трудных задач [17]. Поэтому были рассмотрены различные эвристические алгоритмы. Алгоритм имитации отжига (ИО) кажется вполне подходящим, поскольку он не требует слишком большого вычисления $MENC$ в условии (3). На каждом шаге алгоритма ИО мы находим решение, удовлетворяющее условию (3), путем случайной замены одной точки. Проверенные решения сохраняются в памяти.

5. Пример

Рассмотрим задачу проектирования гиперсети с пропускной способностью каналов и максимальной длиной маршрутов. Для решения этой задачи ищем кратчайший маршрут для каждой пары узлов из X на ветвях первичной сети. Используется алгоритм поиска в ширину. Решая эту задачу, вкладываем вторичную сеть в первичную и, соответственно, получаем гиперсеть.

В качестве исходных данных рассмотрим решетку размером 3 на 3 ($Grid_{3 \times 3}$) (на данной размерности можно легко проверить вычисления вручную) с пропускной способностью для всех каналов, равной двум, и максимальной длиной маршрутов, равной шести, представленную на рис. 6. Красным цветом заданы стоимости расстановки контрольных устройств на ветвях. В качестве порога надёжности примем значение $MENC R = 7.8$.

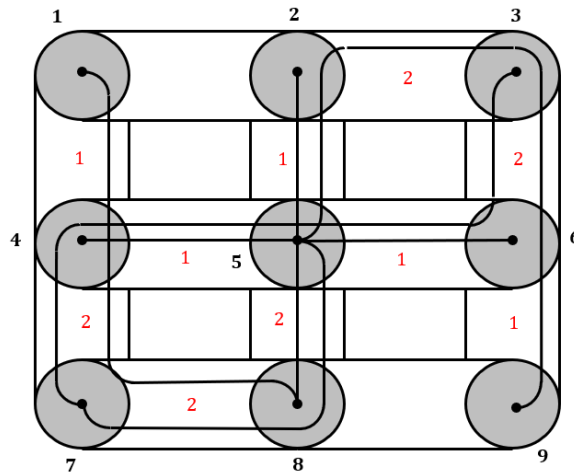


Рис. 6. Демонстрационная гиперсеть

Рассмотрим решение $(4, 7); (5, 6)$, представленное на рис. 7. Данное решение имеет значение целевой функции, равное 3, а значение $MENC - 7.81924$.

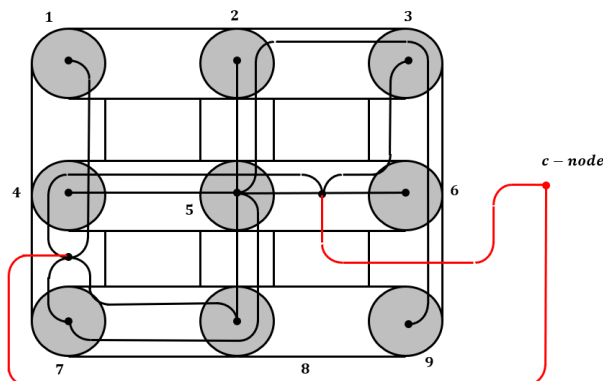


Рис. 7. Решение, полученное с помощью алгоритма ИО

В качестве негативного примера можно привести решение $(4, 5); (5, 6)$, представленное на рис. 8. Хотя данное решение имеет значение целевой функции, равное 2, оно не удовлетворяет требованию надёжности (3), поскольку имеет значение $MENC$, равное 7.67268.

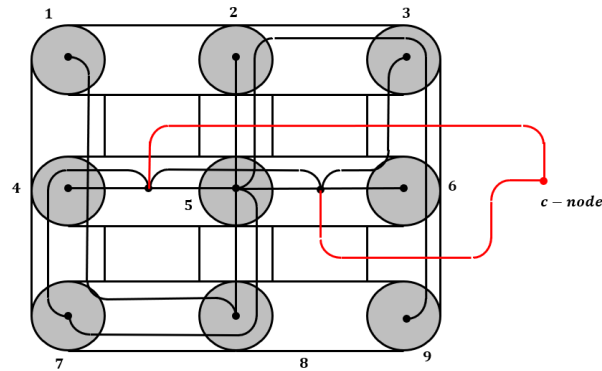


Рис. 8. Негативный пример

6. Заключение

В статье приведён краткий обзор моделей, используемых для проектирования многоуровневых телекоммуникационных сетей. Для задачи повышения надёжности функционирования многоуровневых сетей передачи данных была выбрана модель случайной гиперсети. В качестве показателей надёжности сетевого уровня сети рассматриваются возможность (вероятность) передачи данных между парой узлов в принципе либо по установленным виртуальным каналам и математическое ожидание числа узлов, способных передать данные в центральный узел. Была описана формулировка задачи структурной оптимизации двухуровневой сети мониторинга с ненадёжными каналами (ветвями или рёбрами первичной сети в терминологии гиперсетей). Приведён пример работы алгоритма имитации отжига на небольшой гиперсети.

Литература

1. Кальней А. М. Модели многоуровневых сетей (краткий обзор) // Проблемы информатики. 2021. № 3. С. 5 – 20.
2. Kim J. and Vu V. Sandwiching random graphs: Universality between random graph models // Advances in Mathematics. 2004. V. 188, № 2. P. 444 – 469.
3. Dijkstra F., Andree B., Koymans K., van der Hama J., Grosso P., de Laat C. A multi-layer network model based on ITU-T G.805 // Computer Networks. 2008. V. 52, № 7. P. 1927 – 1937.
4. Rotaru S.. Cross-layer design in wireless local area networks (WLANs) issues and possible solutions. 2018. № 12.
5. Kurant M., Thiran P. Layered complex networks // Physical review letters. 2006. V. 96, № 5. P. 138701.
6. Orłowski S., Raack C., Koster A., Baier G., Engel T., Belotti P. Branch-and-cut techniques for solving realistic two-layer network design problems // Graphs and Algorithms in Communication Networks. 2010. № 1. P. 95 – 118.
7. Chigan C., Atkinson G., Nagarajan R. On the modeling issue of joint cross-layer network protection/restoration // Proceedings of Advanced Simulation Technologies Conference (ASTC '04). 2004. P. 57 – 62.
8. Kivela M., Arenas A., Barthelemy M., Gleeson J. P., Moreno Y. and Porter M. A. Multilayer networks // Journal of Complex Networks. 2013. V. 2, № 3. P. 203 – 271. URL: <https://doi.org/10.1093/comnet/cnu016>.

9. *Popkov V. K., Sokolova O. D.* Application of Hyperneet Theory for the Networks Optimazation Problems // 17th IMACS World Congress, Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation. Paris. 11 – 15 July, 2005. Paper T4-I-42-0112.
10. *Boccaletti S., Bianconi G., Criado R., del Genio C. I., Gomez-Gardenes J., Romance M., Sendina-Nadal I., Wang Z., & Zanin M.* The structure and dynamics of multilayer networks // *Physics Reports*. 2014. V. 544, № 11. P. 1 – 122.
11. *Domenico M. D., Granell C., Porter M. A., & Arenas A.* The physics of spreading processes in multilayer networks // *Nature Physics*. 2016. V. 12. P. 901 – 906.
12. ITU-T Recommendation G.805: Generic functional architecture of transport networks // Tech. rep., International Telecommunication Union. March 2000. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G>.
13. *Попков В. К.* Применение теории S-гиперсетей для моделирования систем сетевой структуры // *Проблемы информатики*. 2010. № 4. С. 17 – 40.
14. *Rodionov A., Rodionova O.* Random Hypernets in Reliability Analysis of Multilayer Networks // *Electrical Engineering*. 2015. V. 343, № 1. P. 307 – 315. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15765-8-17>.
15. *Кальней А. М.* Оптимизация размещения контрольных устройств на каналах в сетях мониторинга // *Проблемы информатики*. 2022. № 4. С. 28 – 38. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-28-38.
16. *Rodionov A. S., Migov D. A.* Obtaining and Using Cumulative Bounds of Network Reliability // *System reliability*. Rijeka: IntechOpen, 2017. P. 93 – 112. DOI: 10.5772/intechopen.72182.
17. *Valiant L. G.* The complexity of computing the permanent // *Theoretical Computer Science*. 1979. V. 8, № 2. P. 189 – 201.

Кальней Артём Максимович

инженер, лаборатория системного моделирования и оптимизации, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (ИВМиМГ СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Проспект Академика Лаврентьева, д. 6), e-mail: artemkalnei@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0003-4107-7995.

Родионов Алексей Сергеевич

д.т.н., заведующий лабораторией системного моделирования и оптимизации, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (ИВМиМГ СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Проспект Академика Лаврентьева, д. 6); профессор кафедры вычислительных систем, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), тел. +7 383 3326949, e-mail: a.rod@sscc.ru, ORCID ID: 0000-0001-8411-4707.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внёс равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

One Problem of Structural Optimization of Data Transmission Networks

Artyom M. Kalney¹, Aleksey S. Rodionov^{1,2}

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS (Novosibirsk)

² Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: The article discusses issues of analysis and structural optimization of multi-level data transmission networks using the random hypernetwork model. It is argued that the main level subjected to destruction under the influence of the external environment and affecting the performance of the network as a whole is the physical level, but in structural terms physical destruction primarily affects the channel level. In turn, failures at the link level affect the organization of work of the network and higher levels; in particular, they require the redistribution of flows including the rebuilding of virtual channels.

A brief overview of multi-level network models used for the analysis and structural optimization of data transmission networks for various purposes (in particular sensor monitoring networks) is presented, a description of a random hypernetwork is given and some problems of increasing the reliability of the functioning of networks at the network level in the event of possible failures of channels and network nodes are discussed, that is, disruption of its operation at the link level.

As indicators of the reliability of the network layer of the network, the possibility (probability) of data transmission between a pair of nodes in principle or via established virtual channels and the mathematical expectation of the number of nodes capable of transmitting data to the central node are considered.

The goals of structural optimization are the best placement of virtual channels in the known structure of the channel network and the placement of base stations in network nodes which connection with the central node is considered to be reliable.

Keywords: network reliability, hypernets, structural optimization.

For citation: Kalney A. M., Rodionov A. S. One problem of structural optimization of data transmission networks (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2024, vol. 18, no. 3, pp. 45-56.

<https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-3-45-56>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License

© Kalney A. M., Rodionov A. S., 2024

The article was submitted: 22.01.2024;
revised version: 12.03.2024;
accepted for publication 14.03.2024.

References

1. Kalney A. M. Modeli mnogourovnevnyh setej (kratkij obzor) [Multilayer network models (brief overview)]. *Problems of computer science*, 2021, no. 3, pp. 5-20.
2. Kim J., Vu V. H. Sandwiching random graphs: Universality between random graph models. *Advances in Mathematics*, 2004, vol. 188, pp. 444-469.
3. Dijkstra F., Andree B., Koymans K., Van der Ham J., Grosso P., and Laat C. A multi-layer network model based on ITU-T G.805. *Computer Networks*, 2008, vol. 52, pp. 1927-1937.
4. Rotaru S. *Cross-layer design in wireless local area networks (WLANs): issues and possible solutions*. 2018.
5. Kurant M., Thiran P. Layered Complex Networks. *Physical review letters*, 2006, vol. 96, pp. 138701.
6. Orłowski S., Raack C., Koster A., Baier G., Engel T., and Belotti P. *Branch-and-Cut Techniques for Solving Realistic Two-Layer Network Design Problems*, 2010, pp. 95-118.
7. Chigan C., Atkinson G., Nagarajan R. On the modeling issue of joint cross-layer network protection/restora-

- tion. *Advanced Simulation Technologies Conference (ASTC '04)*, 2004, pp. 57-62.
8. Kivelä M., Arenas A., Barthelemy M., Gleeson J. P., Moreno Y., and Porter M. A. Multilayer networks. *Journal of Complex Networks*, 2013, vol. 2, pp. 203-271.
 9. Popkov V. K., Sokolova O. D. Application of Hyperneet Theory for the Networks Optimazation Problems. *17th IMACS World Congress, Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation*, 2005.
 10. Boccaletti S., Bianconi G., Herrero R., Genio C., Gómez-Gardeñes J., Romance M., Sendiña-Nadal I., Z.Wang, and Zanin M. The Structure and Dynamics of Multilayer Networks. *Physics Reports*, 2014, vol. 544, pp. 1-122.
 11. Domenico M. D., Granell C., Porter M. A., and Arenas A. The physics of spreading processes in multilayer networks. *Nature Physics*, 2016, vol. 12, pp. 901-906.
 12. ITU-T Recommendation G.805: Generic functional architecture of transport networks : Rep. *Tech. rep., International Telecommunication Union*, 2000.
 13. Popkov V. K. Primenenie teorii S-gipersetej dlya modelirovaniya sistem setevoy struktury [Application of the theory of S-hypernets for modeling network structure systems]. *Problems of computer science*, no. 4, 2010, pp. 17-40.
 14. Rodionov A., Rodionova O. Random Hypernets in Reliability Analysis of Multilayer Networks. *Electrical Engineering*, 2015, vol. 343, pp. 307-315.
 15. Kalney A. M. Optimizaciya razmeshcheniya kontrol'nyh ustrojstv na kanalah v setyah monitoringa [Optimizing the placement of control devices on channels in monitoring networks]. *Problems of computer science*, 2022, no. 4, pp. 28-38.
 16. Rodionov A. S., Migov D. A. Obtaining and Using Cumulative Bounds of Network Reliability. *System Reliability*, 2017.
 17. Valiant L. The complexity of computing the permanent. *Theoretical Computer Science*, 1979, vol. 8, no. 2, pp. 189-201.

Artyom M. Kalney

Engineer. Laboratory of System Modeling and Optimization, Institute of Computational Mathematics and mathematical geophysics SB RAS (ICMaMG SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev Avenue St. 6), e-mail: artemkalnei@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0003-4107-7995.

Aleksej S. Rodionov

Dr. of Sci. (Engineering); Head of the Laboratory of System Modeling and Optimization, Institute of Computational Mathematics and mathematical geophysics SB RAS (ICMaMG SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev Avenue St. 6); Professor of the Department of computer science, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS), phone: +7 383 3326949, e-mail: alrod@sscc.ru, ORCID ID: 0000-0001-8411-4707.