Сетевое программирование

Лекция 9

Надёжность и отказоустойчивость сетей. Моделирование отказов узлов и каналов

Усіпов Н.М., PhD · КазНУ имени аль-Фараби

Цель и план лекции

Цель

Изучение структурных показателей надёжности сети, методов моделирования отказов узлов и каналов и способов оценки устойчивости сети с помощью NetworkX.

1. Введение
2. Структурные показатели надёжности
3. Методы проектирования отказоустойчивых сетей
4. Моделирование отказов
5. Перколяция и теоретические пороги
6. Показатели качества при отказах
7. Модели каскадных отказов и механизмы восстановления

1 Введение

- Любой элемент сети связи рано или поздно выходит из строя: оптические линии повреждаются при земляных работах, оборудование отказывает из-за неисправностей и ошибок конфигурации, а локальное энергоснабжение может быть нарушено.
- Надёжность сети складывается из двух составляющих: надёжности самих компонентов и структуры их соединений.

2 Структурные показатели надёжности

Мост

Ребро, удаление которого увеличивает число компонент связности. В сети это канал, для которого нет обходного пути.

Точка сочленения

Вершина, удаление которой разделяет граф. Такой узел является единой точкой отказа.

Рёберная связность

Наименьшее число рёбер λ(G), удаление которых делает граф несвязным. Сеть с рёберной связностью k выдерживает любой отказ k−1 каналов.

Вершинная связность

Наименьшее число вершин κ(G), удаление которых делает граф несвязным или сводит его к одной вершине.

$$\kappa(G) \le \lambda(G) \le \delta(G),$$

2 Структурные показатели надёжности (продолжение)

Независимые пути

По теореме Менгера наибольшее число путей между двумя узлами, не имеющих общих рёбер (или промежуточных вершин), равно минимальному числу рёбер (вершин), разделяющих эти узлы.

3 Методы проектирования отказоустойчивых сетей

Критерий N–1

Сеть должна оставаться работоспособной при выходе из строя любого одного элемента.

Кольцевые структуры

Кольцо обеспечивает два независимых пути и поэтому выдерживает одиночный обрыв.

Диверсификация трасс

Каналы, логически различные, могут проходить в одном кабеле или одной канализации.

Резервирование оборудования

Дублирование плат, блоков питания и маршрутизаторов предотвращает потерю целого узла.

3 Методы проектирования отказоустойчивых сетей (продолжение)

- Оценка надёжности выполняется и в вероятностной форме. Если элементы с коэффициентами готовности A_i соединены последовательно, общая готовность равна их произведению.

$$A_{посл} = \Pi\, A_i, \quad A_{пар} = 1 - \Pi\,(1 - A_i).$$

- Например, два последовательно включённых канала с готовностью 0,99 обеспечивают общую готовность 0,9801, а параллельное соединение тех же каналов – 0,9999.

3 Анализ структурной надёжности

Листинг 9.1.

```
import networkx as nx

G = nx.Graph([("A", "B"), ("B", "C"), ("C", "A"), ("C", "D"),
              ("D", "E"), ("E", "F"), ("F", "D")])

print("Мосты:", list(nx.bridges(G)))
print("Точки сочленения:", sorted(nx.articulation_points(G)))
print("Рёберная связность:", nx.edge_connectivity(G))
print("Вершинная связность:", nx.node_connectivity(G))

R = nx.cycle_graph(6)
print("Кольцо, рёберная связность:", nx.edge_connectivity(R))
print("Независимые пути 0-3:",
      list(nx.node_disjoint_paths(R, 0, 3)))
```

3 Результат: Анализ структурной надёжности

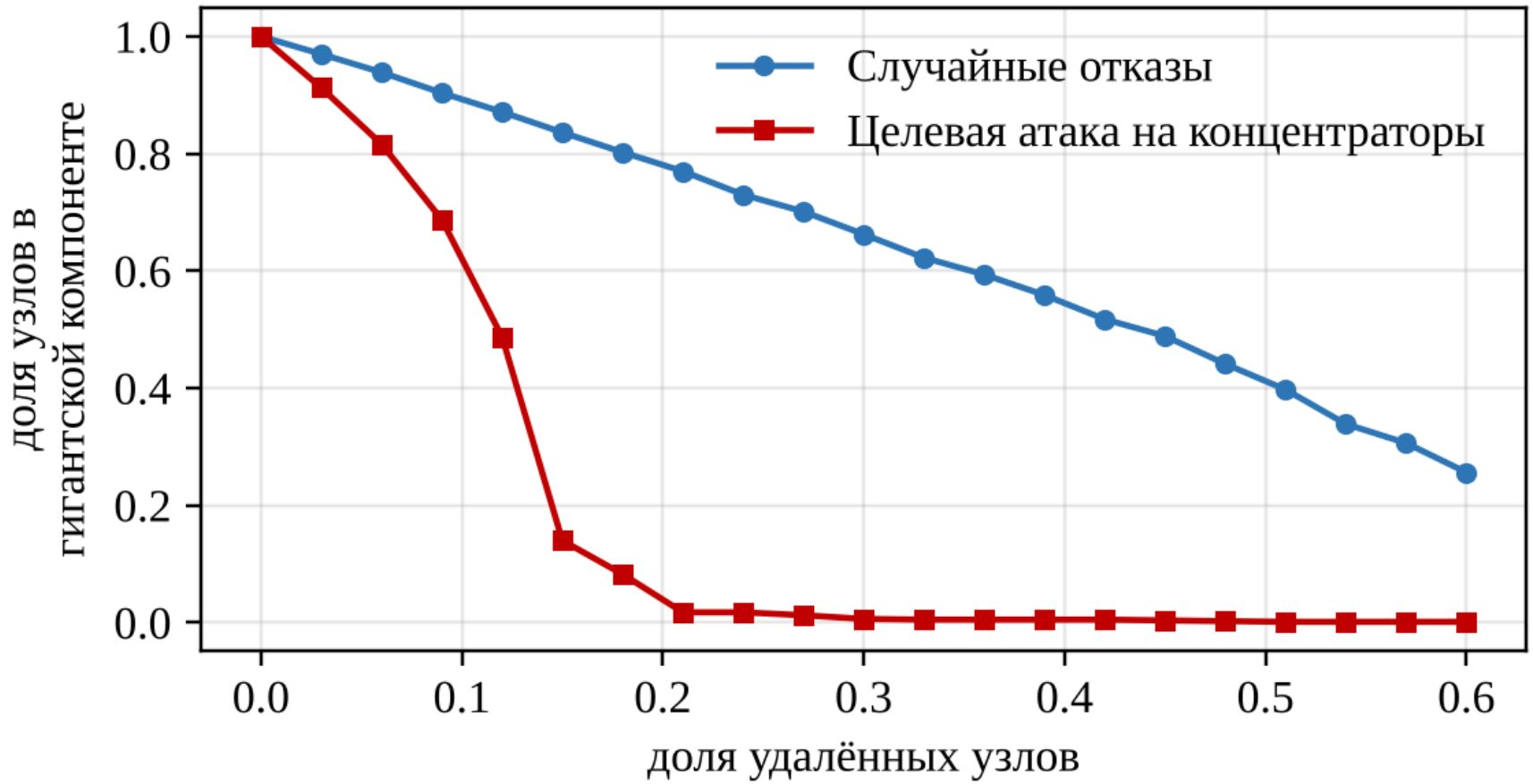
```
Мосты: [('C', 'D')]
Точки сочленения: ['C', 'D']
Рёберная связность: 1
Вершинная связность: 1
Кольцо, рёберная связность: 2
Независимые пути 0-3: [[0, 1, 2, 3], [0, 5, 4, 3]]
```

Результат показывает, что в первой сети единственный канал C–D является мостом, а узлы C и D – точками сочленения.

4 Моделирование отказов

- Для оценки устойчивости проводится вычислительный эксперимент. Элементы последовательно удаляются из копии графа, после чего вычисляются показатели качества.
- Важно определить порядок удаления. При случайных отказах элементы выбираются равновероятно, а при атаке – в порядке убывания степени или центральности.

4 Моделирование отказов (продолжение)



Устойчивость безмасштабной сети к случайным отказам и целевой атаке

4 Моделирование отказов (продолжение)

- Обычно рассматривают два варианта целевой атаки. При статической атаке порядок узлов определяется заранее по исходному графу.
- Также следует учитывать каскадные отказы: при выходе канала трафик перераспределяется на соседние линии, что может вызвать их перегрузку и последующий отказ.

4 Моделирование случайных отказов и атаки

Листинг 9.2.

```
import random

def lcc_share(G, order, fraction):
    H = G.copy()
    H.remove_nodes_from(order[:int(fraction * len(G))])
    return len(max(nx.connected_components(H), key=len)) / len(G)

G = nx.barabasi_albert_graph(1000, 2, seed=1)
rnd = list(G.nodes)
random.Random(1).shuffle(rnd)
attack = sorted(G, key=G.degree, reverse=True)

print("Удалено   Случайно   Атака")
for f in (0.01, 0.05, 0.10, 0.20):
    print(f"{f:6.0%} {lcc_share(G, rnd, f):10.3f} "
          f"{lcc_share(G, attack, f):7.3f}")
```

4 Результат: Моделирование случайных отказов и атаки

```
Удалено   Случайно   Атака
    1%      0.990   0.979
    5%      0.950   0.838
   10%      0.897   0.567
   20%      0.777   0.020
```

Приведённые значения получены на одной реализации сети с одним порядком случайных отказов.

5 Перколяция и теоретические пороги

- Удаление узлов сети можно рассматривать как задачу перколяции: каждый узел сохраняется с вероятностью q, и необходимо определить, при каком значении q исчезает гигантская компонента.

$$\langle k^2 \rangle / \langle k \rangle > 2.$$

- Отсюда получается пороговая доля случайно удаляемых узлов (Коэн и др., 2000):

$$f_c = 1 - 1 / (\langle k^2 \rangle / \langle k \rangle - 1).$$

- Для случайного графа Эрдёша–Реньи $\langle k^2 \rangle / \langle k \rangle = \langle k \rangle + 1$, поэтому $f_c = 1 - 1/\langle k \rangle$.

6 Показатели качества при отказах

Сохранение связности является лишь минимальным требованием. Для более полной оценки используют следующие показатели.

Глобальная эффективность

Определена и для несвязных сетей, отражает средний обратный путь.

Устойчивость R (Шнайдер и др., 2011)

Среднее значение доли узлов в наибольшей компоненте для всех шагов последовательного удаления.

Пропускная способность

Максимальный поток между важными парами узлов после отказа.

Количество затронутых абонентов

Учитывает не только топологию, но и распределение пользователей по узлам.

6 Показатели качества при отказах (продолжение)

Загрузка оставшихся каналов

Показывает, сможет ли сеть обслужить трафик после перераспределения.

7 Модели каскадных отказов и механизмы восстановления

- В модели Моттера–Лая каждому узлу присваивается ёмкость, пропорциональная его начальной нагрузке с запасом α: C = (1 + α)L. После отказа узла трафик перераспределяется, нагрузка других узлов изменяется, и узлы, превысившие ёмкость, также отключаются.
- Сети связи располагают средствами восстановления, которые различаются по времени реакции.

7 Модели каскадных отказов и механизмы восстановления (продолжение)

Защита

Резервный путь рассчитан заранее и переключение занимает десятки миллисекунд.

Восстановление

Новый путь рассчитывается после отказа. Время больше, но ресурсы используются эффективнее.

7 Модели каскадных отказов и механизмы восстановления (продолжение)

- Важным понятием являются группы общего риска (SRLG). Каналы, проложенные в одном кабеле, разрушаются одновременно.
- Поскольку вероятности отказов элементов малы, точная вероятность связности сети вычисляется трудно: эта задача является #P-трудной в общем случае.

8 Разбор примера

1. Пусть канал имеет готовность 0,99.
2. Маршрут из двух последовательных каналов имеет готовность $0{,}99 \cdot 0{,}99 = 0{,}9801$.
3. Два независимых маршрута такого типа, включённые параллельно, дают готовность $1 - (1 - 0{,}9801)^2 \approx 0{,}999604$.
4. За год (8760 ч) неготовность одного канала составляет 87,6 ч, маршрута из двух каналов – около 174 ч, а параллельной схемы – только около 3,5 ч.
5. Пример показывает, что резервирование значительно эффективнее, чем повышение надёжности каждого элемента в отдельности.
6. Если оба маршрута имеют общий участок, формула параллельного соединения неприменима, и надёжность будет определяться именно этим участком.

9 Вопросы для обсуждения на занятии

Защита сети

Какие узлы и каналы необходимо дублировать, если бюджет позволяет построить только один новый канал?

Запас

Как определить разумный запас пропускной способности с точки зрения каскадных отказов?

Зависимость

Какие скрытые зависимости могут сделать два резервных канала фактически одним?

Контрольные вопросы

1. Что такое мост и точка сочленения? Приведите примеры из телекоммуникаций.
2. Чем различаются вершинная и рёберная связность? Запишите неравенство Уитни.
3. Сформулируйте теорему Менгера и объясните её практический смысл.
4. В чём заключается критерий N−1?
5. Как рассчитать коэффициент готовности при последовательном и параллельном соединении элементов?
6. Какие показатели применяются при моделировании отказов?
7. Чем случайные отказы отличаются от целевой атаки? Почему безмасштабные сети уязвимы к атакам?
8. Что такое каскадные отказы и почему их нельзя выявить только топологическим анализом?

Список литературы

1. Menger K. Zur allgemeinen Kurventheorie // Fundamenta Mathematicae. – 1927. – Vol. 10. – P. 96–115.
2. Whitney H. Congruent graphs and the connectivity of graphs // American Journal of Mathematics. – 1932. – Vol. 54, No. 1. – P. 150–168.
3. Albert R., Jeong H., Barabási A.-L. Error and attack tolerance of complex networks // Nature. – 2000. – Vol. 406. – P. 378–382.
4. Cohen R., Erez K., ben-Avraham D., Havlin S. Resilience of the Internet to random breakdowns // Physical Review Letters. – 2000. – Vol. 85. – P. 4626–4628.
5. Motter A.E., Lai Y.-C. Cascade-based attacks on complex networks // Physical Review E. – 2002. – Vol. 66. – Art. 065102.
6. Newman M. Networks. – 2nd ed. – Oxford: Oxford University Press, 2018. – 780 p.
7. NetworkX Documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://networkx.org/documentation/stable/