# Сетевое программирование

*Лекция 13*

## Моделирование телекоммуникационных сетей. Сети передачи данных, маршрутизация, топологии (звезда, кольцо, сетка)

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

# Цель и план лекции

## Цель

Изучение принципов построения графовых моделей телекоммуникационных сетей, сравнение типовых топологий по количественным показателям и моделирование маршрутизации и задержек средствами NetworkX.

1. Введение
2. Структура сети передачи данных
3. Основные топологии
4. Моделирование маршрутизации
5. Модель сети на уровне потоков и оценка качества
6. Архитектуры современных сетей

# 1 Введение

- В предыдущих лекциях были рассмотрены отдельные методы теории графов. В данной лекции они объединяются для решения инженерной задачи – построения модели телекоммуникационной сети.
- Модель является упрощением реальности, поэтому её точность определяется поставленной задачей.

# 2 Структура сети передачи данных

Сеть оператора обычно строится по иерархическому принципу и включает следующие уровни:

### Уровень доступа

Подключает абонентские устройства: компьютеры, телефоны и датчики. Большое количество узлов сочетается с простой топологией.

### Уровень агрегации

Объединяет трафик уровня доступа, реализует политики обслуживания и резервирование.

### Уровень ядра

Обеспечивает высокоскоростную передачу больших объёмов данных между регионами.

*Передача пакетов от источника к получателю сопровождается суммарной задержкой, которая складывается из нескольких составляющих:*

# 2 Структура сети передачи данных (продолжение)

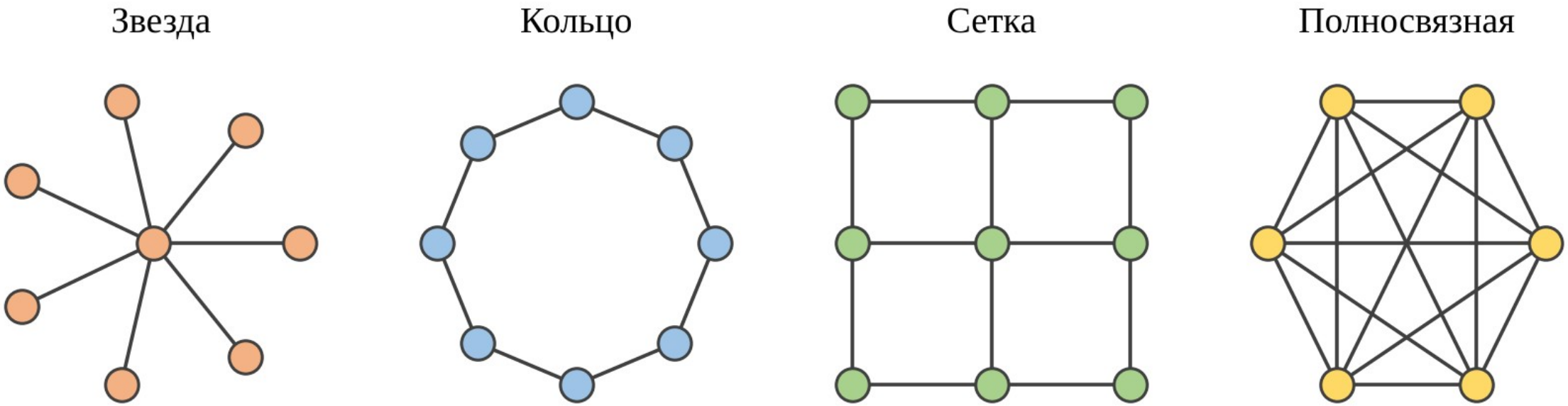
- задержка распространения – отношение длины линии к скорости распространения сигнала (в оптическом волокне приблизительно 5 мкс на километр);
- задержка передачи – отношение размера пакета к скорости канала;
- задержка обработки в устройстве;
- задержка в очереди, зависящая от загрузки канала.
- Для приближённой оценки очереди используется модель M/M/1, в которой среднее время нахождения пакета в системе определяется формулой:

$$T = 1 / (\mu - \lambda),$$

# 2 Структура сети передачи данных (продолжение)

- где μ – интенсивность обслуживания, а λ – интенсивность поступления пакетов.

# 3 Основные топологии




*Типовые топологии сетей*

# 3 Основные топологии (продолжение)

## Звезда

Все устройства соединены с центральным узлом. Топология проста и экономична, легко расширяется, но центральный узел является единой точкой отказа.

## Кольцо

Каждый узел соединён с двумя соседями. Кольцо обеспечивает два независимых маршрута и выдерживает одиночный обрыв, однако диаметр растёт пропорционально числу узлов.

## Сетка (решётка)

Узлы расположены в виде решётки и соединены с ближайшими соседями. Обеспечивает несколько альтернативных маршрутов.

## Полносвязная топология

Каждая пара узлов соединена непосредственно. Обладает максимальной надёжностью и минимальным диаметром, однако число каналов растёт квадратично, поэтому применяется для небольшого числа магистральных узлов.

# 3 Основные топологии (продолжение)

### Дерево

Иерархическая топология без избыточных соединений, характерная для сетей доступа.

# 3 Основные топологии (продолжение)

- Реальные сети обычно являются гибридными: кольца на уровне агрегации сочетаются со звёздами доступа и частично-сеточным ядром.

# 3 Сравнение топологий из 16 узлов

Листинг 13.1.

```
import networkx as nx

topo = {
    "Звезда": nx.star_graph(15),
    "Кольцо": nx.cycle_graph(16),
    "Сетка 4x4": nx.grid_2d_graph(4, 4),
    "Полносвязная": nx.complete_graph(16),
}
print(f"{'Топология':13} Рёбер Диам.  Ср.путь Связн.")
for name, G in topo.items():
    print(f"{name:13} {G.number_of_edges():5} "
          f"{nx.diameter(G):5} "
          f"{nx.average_shortest_path_length(G):8.2f} "
          f"{nx.node_connectivity(G):5}")
```

# 3 Результат: Сравнение топологий из 16 узлов

```
Топология     Рёбер Диам.  Ср.путь Связн.
Звезда           15     2     1.88     1
Кольцо           16     8     4.27     2
Сетка 4x4        24     6     2.67     2
Полносвязная    120     1     1.00    15
```

Таблица результатов наглядно показывает компромисс между стоимостью и характеристиками.

# 4 Моделирование маршрутизации

- Модель маршрутизации на графе строится следующим образом. Каждому каналу назначается метрика; для каждого маршрутизатора вычисляется дерево кратчайших путей; из него формируется таблица маршрутизации, в которой для каждого адресата хранится только следующий переход.

- В протоколах состояния каналов все узлы располагают общей картой сети. Поэтому метрику выбирают согласованно: например, в OSPF стоимость канала часто рассчитывается как отношение опорной полосы к его пропускной способности.

# 4 Таблица маршрутизации и расчёт задержки

Листинг 13.2.

```
G = nx.Graph()
LINKS = [("R1", "R2", 1000, 200), ("R2", "R3", 100, 50),
         ("R1", "R4", 1000, 300), ("R4", "R3", 1000, 400),
         ("R3", "R5", 10000, 120)]
REF = 100000                          # опорная полоса, Мбит/с
for u, v, bw, km in LINKS:
    G.add_edge(u, v, bw=bw, km=km, cost=REF // bw,
               delay=km * 0.005)      # задержка, мс

src = "R1"
dist, paths = nx.single_source_dijkstra(G, src, weight="cost")
print("Адресат  След.  Стоимость  Задержка, мс")
for dst in sorted(paths):
    if dst == src:
        continue
    p = paths[dst]
    d = nx.path_weight(G, p, "delay")
    print(f"{dst:7} {p[1]:6} {dist[dst]:9} {d:12.2f}")
```

# 4 Результат: Таблица маршрутизации и расчёт задержки

```
Адресат  След.  Стоимость  Задержка, мс
R2       R2           100          1.00
R3       R4           200          3.50
R4       R4           100          1.50
R5       R4           210          4.10
```

В результате маршрут к узлу R3 проходит через узел R4, а не через R2, несмотря на то что канал R1–R2 короче: стоимость низкоскоростного канала R2–R3 оказывается высокой.

# 5 Модель сети на уровне потоков и оценка качества

- Для инженерного расчёта часто применяют модель, в которой трафик представлен матрицей T, элементы $T_{ij}$ которой показывают средний объём передаваемых данных между парой узлов.
- Основными показателями качества обслуживания являются задержка, джиттер, потери пакетов и пропускная способность.
- Для оценки размеров очереди используют формулы теории массового обслуживания.
- Особое значение в работе сетей передачи данных имеет протокол TCP. Он регулирует скорость передачи исходя из потерь или задержки.

# 6 Архитектуры современных сетей

### Архитектура центров обработки данных

Топология Клоза (fat-tree, spine–leaf) обеспечивает большое количество равноценных путей между серверами и одинаковое число переходов между ними.

### Сотовые сети

Базовые станции подключаются к транспортной сети, а связь с ядром реализуется по кольцевым или древовидным схемам.

### Программно-определяемые сети

Логика управления размещается в контроллере, а коммутаторы выполняют передачу согласно установленным правилам.

### Автономные системы и Интернет

Сеть рассматривается на уровне операторов и точек обмена трафиком. Коммерческие отношения определяют допустимые маршруты: путь обычно должен быть «без долины» (valley-free).

# 6 Архитектуры современных сетей (продолжение)

- Для создания цифровых двойников сетей применяют подход, при котором модель автоматически синхронизируется с данными реальной сети.
- Этапы разработки модели включают сбор топологии, задание параметров, определение матрицы трафика, вычисление маршрутов, расчёт нагрузок и показателей, анализ сценариев отказов и подготовку рекомендаций.

# 7 Разбор примера

1. Рассчитаем задержку передачи пакета размером 1500 байт по каналу 1 Гбит/с длиной 400 км.
2. Размер пакета равен 12000 бит.
3. Задержка передачи: $12000 / 10^9 = 12$ мкс.
4. Задержка распространения: 400 км · 5 мкс/км = 2 мс, то есть она намного больше задержки передачи.
5. Интенсивность обслуживания составляет $\mu = 10^9/12000 \approx 83333$ пакета/с.
6. По модели M/M/1 среднее время в системе $T = 1/(\mu(1 - \rho))$.
7. При $\rho = 0{,}5$ оно равно 24 мкс, а при $\rho = 0{,}9$ – 120 мкс.

# 7 Разбор примера (продолжение)

8 Даже при высокой нагрузке этот вклад в данном примере меньше задержки распространения, однако на низкоскоростных каналах вклад очереди становится решающим.

# 8 Вопросы для обсуждения на занятии

### Проектирование

Какую топологию предложить для сети университетского кампуса из пяти корпусов?

### Качество

Какая составляющая задержки преобладает в сети внутри здания и в межконтинентальной линии?

### Адекватность

Какими измерениями проверить правильность модели сети?

# Контрольные вопросы

1. Какие уровни включает иерархическая сеть оператора и каковы их функции?
2. Из каких составляющих складывается задержка передачи данных?
3. Как зависит средняя задержка от загрузки канала в модели M/M/1?
4. Сравните звёздную, кольцевую и сеточную топологии.
5. В чём состоит компромисс между стоимостью и надёжностью при выборе топологии?
6. Как на основе кратчайших путей формируется таблица маршрутизации?
7. Как метрика канала влияет на выбор маршрута в протоколе OSPF?
8. В чём заключаются ограничения графовых моделей сети по сравнению с симуляторами?

# Список литературы


1. Tanenbaum A.S., Feamster N., Wetherall D. Computer Networks. – 6th ed. – Boston: Pearson, 2021.
2. Kurose J.F., Ross K.W. Computer Networking: A Top-Down Approach. – 8th ed. – Boston: Pearson, 2021.
3. Kleinrock L. Queueing Systems. Vol. 1: Theory. – New York: Wiley, 1975.
4. Moy J. OSPF Version 2: RFC 2328. – IETF, 1998.
5. Riley G.F., Henderson T.R. The ns-3 network simulator // Modeling and Tools for Network Simulation. – Berlin: Springer, 2010. – P. 15–34.
6. NetworkX Documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://networkx.org/documentation/stable/