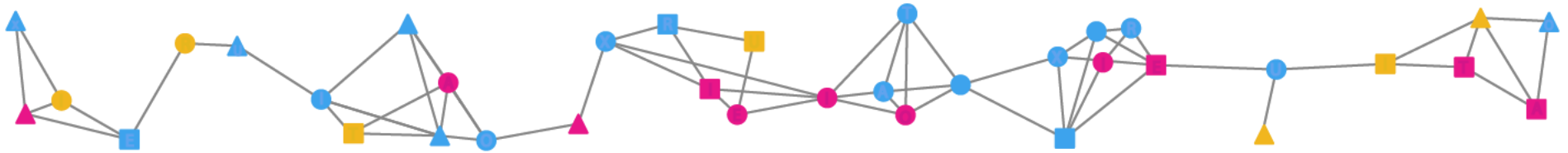


计算机网络

第四章 网络层

谢瑞桃
xie@szu.edu.cn
rtxie.github.io
计算机与软件学院
深圳大学

第四章讲解内容

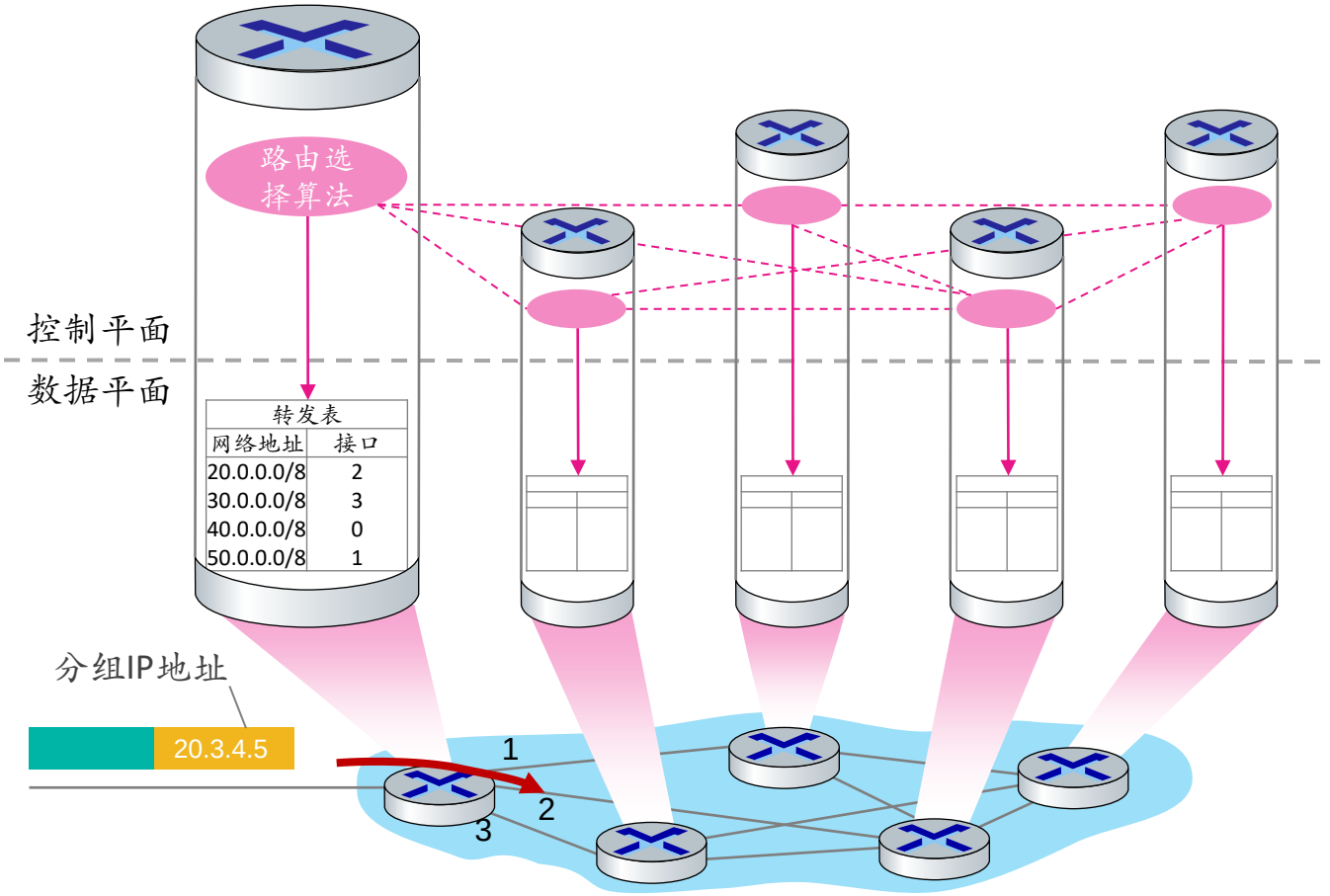
1. 网络层概述与数据平面
2. 控制平面

网络层的功能

- 转发
  - 路由器将分组由一条输入链路移动到适当的输出链路
  - 时间要求是纳秒级别
  - 由硬件实现
- 路由选择
  - 决定将分组由源主机移动到目的主机所要经过的路由或路径
  - 时间要求是秒级别
  - 由软件实现

网络层的功能

- 每个路由器的路由选择组件相互通信，合作生成转发表

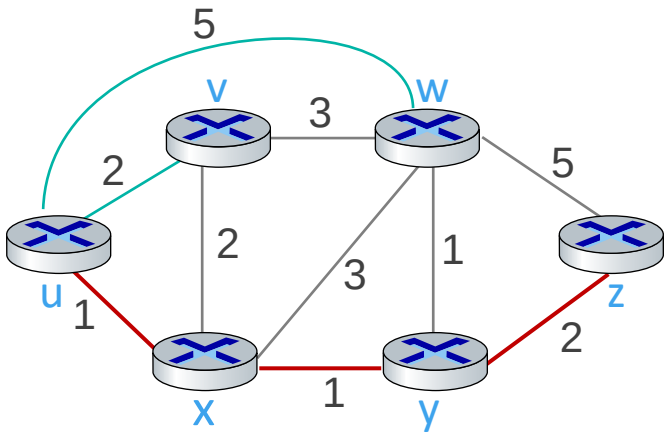


控制平面讲解内容

- 路由协议的目的与算法分类
- 距离向量路由选择算法
- 可扩展的路由选择
- AS内路由协议：OSPF
- AS间路由协议：BGP
- ICMP协议

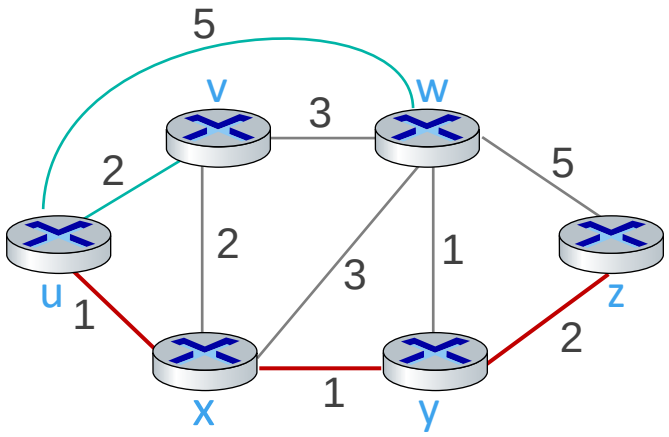
路由协议

- 目的是决定从发送主机到接收主机之间的好的网路路径
  - 网络路径：一连串路由器
  - 好：最少跳数，最低时延，最低开销



网络建模

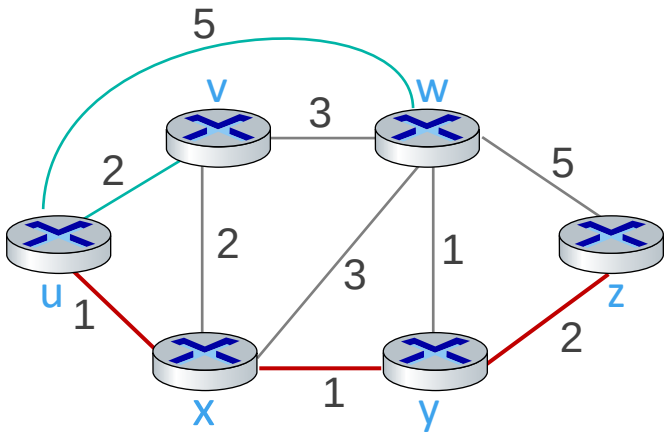
- 图$G = <N, E>$
- 节点集合$N = \{u, v, w, x, y, z\}$
- 链路集合$E = \{(u, v), (u, x), (u, w), (v, x), (v, w), (x, w), (x, y), (w, y), (w, z), (y, z)\}$



网络建模

- $c(x, y)$：链路(x, y)的开销
- 路径$(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{n-1}, x_n)$的开销：

$$c(x_1, x_2) + c(x_2, x_3) + \ldots + c(x_{n-1}, x_n)$$



路由算法分类

- 集中式
  - 每个路由器都拥有完整的拓扑，链路开销
  - 链路状态（link state）算法
- 分布式
  - 每个路由器只知道邻居节点，以及与邻居节点之间的链路开销
  - 迭代地与邻居交换信息，并进行计算
  - 距离向量（distance vector）算法

链路状态路由选择算法

- 每个节点都知道网络拓扑和所有的链路开销
- 如何知道呢?
- 每个节点向网络中的所有其他节点广播其链路状态，包括链接的标识和开销
- 已知完整网络后，如何求解最低开销路径?
- Dijkstra算法

第四章知识点汇总

- 了解路由协议的目的
- 了解链路状态路由选择算法的原理

控制平面讲解内容

- 路由协议的目的与算法分类
- 距离向量路由选择算法
- 可扩展的路由选择
- AS内路由协议：OSPF
- AS间路由协议：BGP
- ICMP协议

八卦

Norman Rockwell (1894-1978), "The Gossips," 1948. Painting for "The Saturday Evening Post" cover, March 6, 1948. Oil on canvas. Private collection. ©SEPS: Curtis Publishing, Indianapolis, IN

https://www.sothebys.com/en/auctions/ecatalogue/2013/american-art-n09048/lot.16.html

距离向量路由选择算法

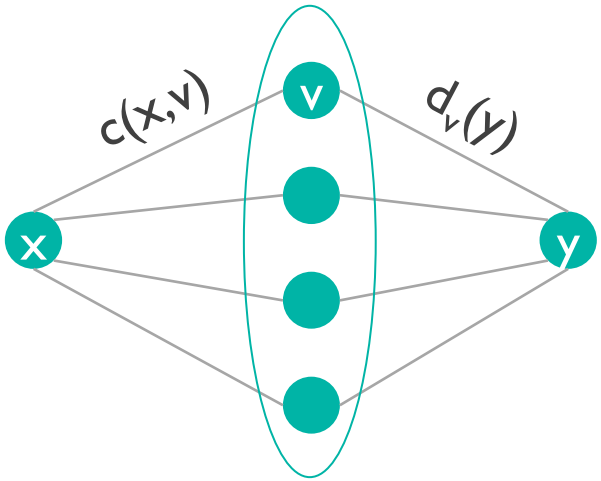
- Bellman-Ford公式

$$d_x(y) = min_v\{c(x,v) + d_v(y)\}$$

$d_x(y)$：节点x到节点y的最短距离

$c(x,v)$：x到邻居节点v的距离

$d_v(y)$：节点v到节点y的最短距离



节点x的邻居节点v的集合

距离向量路由选择算法

- Bellman-Ford公式

$$d_x(y) = min_v\{c(x,v) + d_v(y)\}$$

$d_x(y)$：节点x到节点y的最短距离

$c(x,v)$：x到邻居节点v的距离

$d_v(y)$：邻居v到节点y的最短距离

- $\mathbf{d_x = [d_x(y): y \in N]}$ 称为节点x的距离向量(Distance Vector)

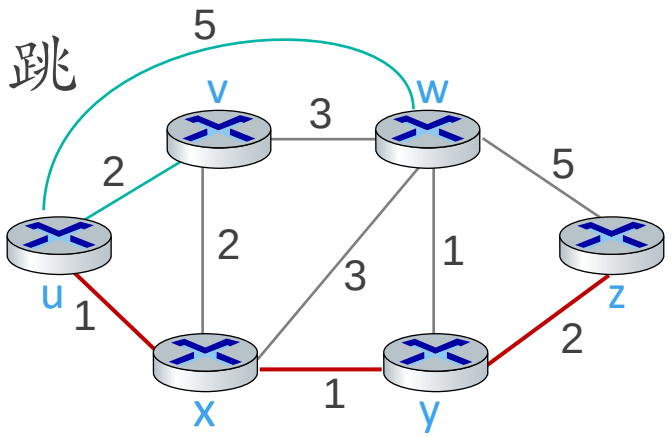
距离向量路由选择算法

- $d_v(z) = 5, d_x(z) = 3, d_w(z) = 3$

- $d_u(z) = \min \{c(u,v)+d_v(z), c(u,x)+d_x(z), c(u,w)+d_w(z)\}$

  $= \min \{2 + 5, 1 + 3, 5 + 3\} = 4$

- u到z的最短路径上：x是下一跳



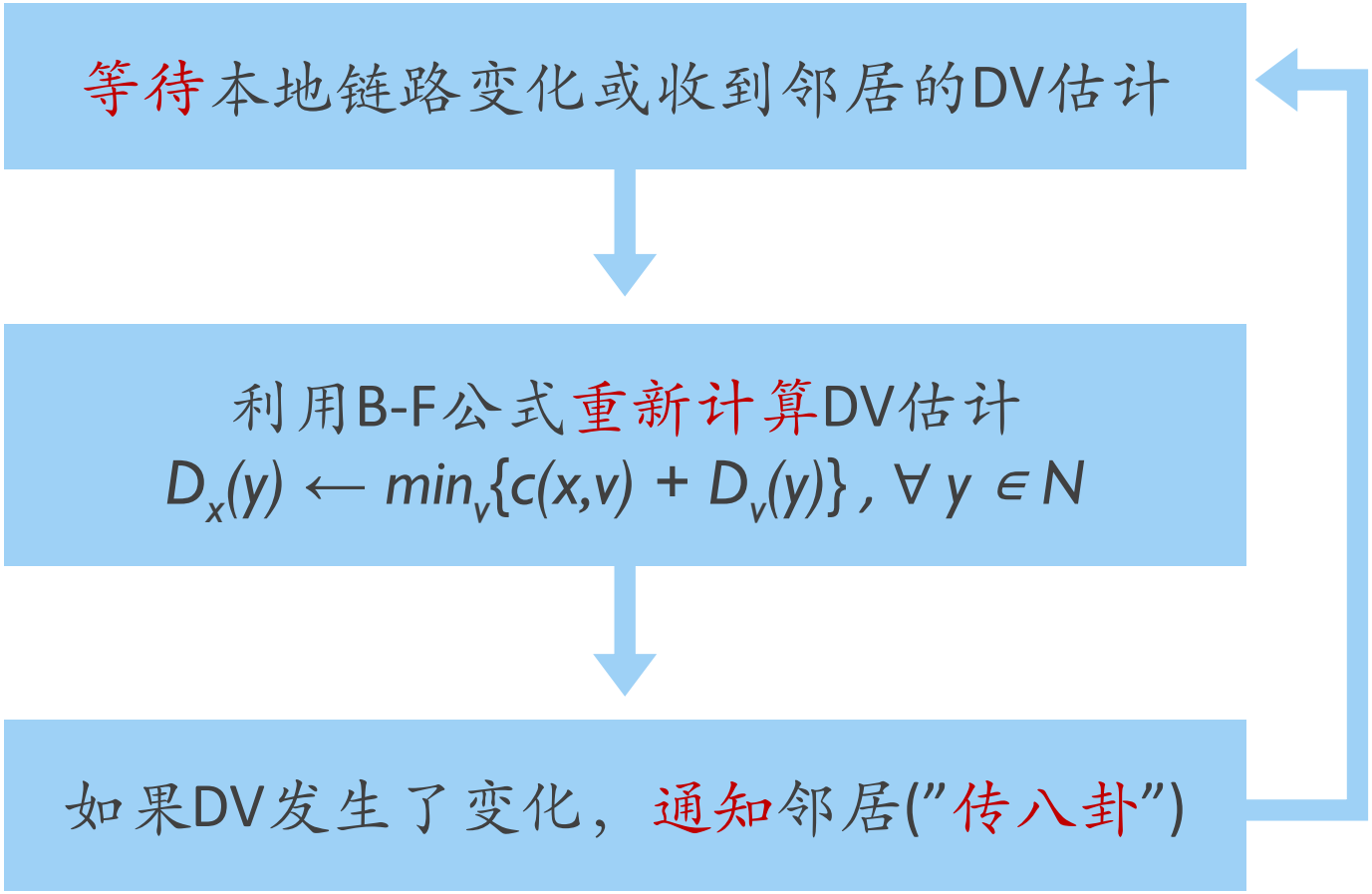
距离向量路由选择算法

- $D_x(y)$ = 从x到y的最小开销估计
- $\mathbf{D}_x = [D_x(y): y \in N]$ 称为节点x的距离向量估计

- 节点x维护以下信息：
  - x到邻居v的直达开销c(x, v)
  - x的距离向量估计$\mathbf{D}_x = [D_x(y): y \in N]$
  - x的每个邻居的距离向量估计$\mathbf{D}_v = [D_v(y): y \in N]$

距离向量路由选择算法

每个节点独立运行以下程序



距离向量路由选择算法

节点x的表

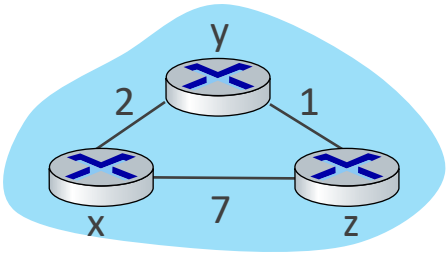
	x	y	z
x	0	2	7
y	∞	∞	∞
z	∞	∞	∞

节点y的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	2	0	1
z	∞	∞	∞

节点z的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	∞	∞	∞
z	7	1	0



距离向量路由选择算法

节点x的表

	x	y	z
x	0	2	7
y	∞	∞	∞
z	∞	∞	∞

节点y的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	2	0	1
z	∞	∞	∞

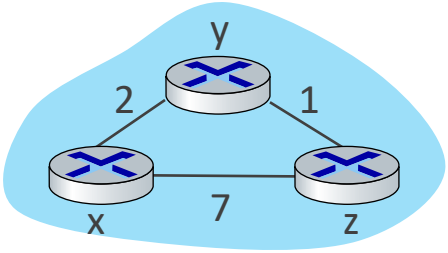
节点z的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	∞	∞	∞
z	7	1	0

	x	y	z
x	0		
y	2	0	1
z	7	1	0

$D_x(y) = \min\{c(x, y) + D_y(y), c(x, z) + D_z(y)\}$

来自节点自身的观测　　来自邻居节点的传输



距离向量路由选择算法

节点x的表

	x	y	z
x	0	2	7
y	∞	∞	∞
z	∞	∞	∞

节点y的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	2	0	1
z	∞	∞	∞

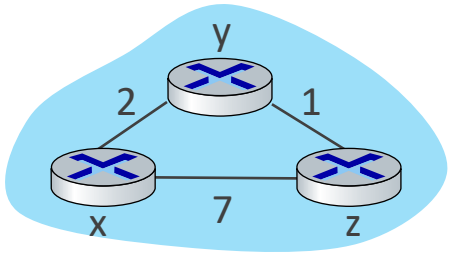
节点z的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	∞	∞	∞
z	7	1	0

	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	7	1	0

$D_x(y) = \min\{c(x, y) + D_y(y), c(x, z) + D_z(y)\}$
$= \min\{2+0, 7+1\} = 2$

$D_x(z) = \min\{c(x, y) + D_y(z), c(x, z) + D_z(z)\}$
$= \min\{2+1, 7+0\} = 3$



距离向量路由选择算法

节点x的表

	x	y	z
x	0	2	7
y	∞	∞	∞
z	∞	∞	∞

节点y的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	2	0	1
z	∞	∞	∞

节点z的表

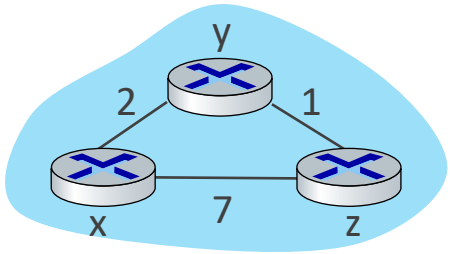
	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	∞	∞	∞
z	7	1	0

	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	7	1	0

	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	7	1	0

$D_y(x) = \min\{c(y, x) + D_x(x), c(y, z) + D_z(x)\}$
$= \min\{2+0, 1+7\} = 2$

$D_y(z) = \min\{c(y, x) + D_x(z), c(y, z) + D_z(z)\}$
$= \min\{2+7, 1+0\} = 1$



距离向量路由选择算法

节点x的表

	x	y	z
x	0	2	7
y	∞	∞	∞
z	∞	∞	∞

	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	7	1	0

节点y的表

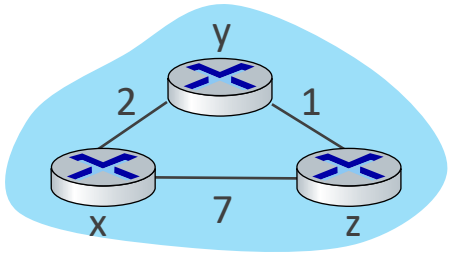
	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	2	0	1
z	∞	∞	∞

	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	7	1	0

节点z的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	∞	∞	∞
z	7	1	0

	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	3	1	0



距离向量路由选择算法

节点x的表

	x	y	z
x	0	2	7
y	∞	∞	∞
z	∞	∞	∞

	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	7	1	0

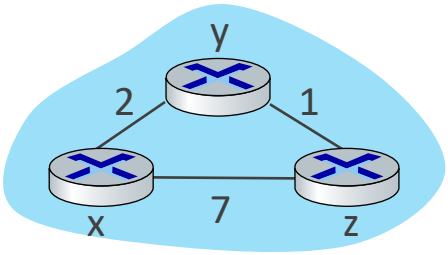
发生了变化，因此需要发给其邻居节点

节点y的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	2	0	1
z	∞	∞	∞

	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	7	1	0

没发生变化，所以不需要发给邻居节点



节点z的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	∞	∞	∞
z	7	1	0

	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	3	1	0

发生了变化，因此需要发给其邻居节点

距离向量路由选择算法

节点x的表

	x	y	z
x	0	2	7
y	∞	∞	∞
z	∞	∞	∞

	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	7	1	0

	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	3	1	0

节点y的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	2	0	1
z	∞	∞	∞

	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	7	1	0

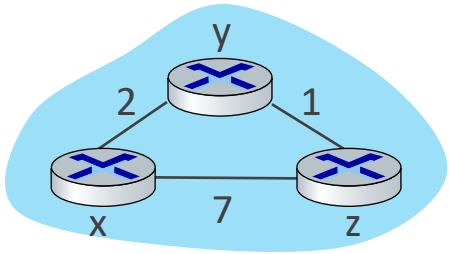
	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	3	1	0

节点z的表

	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	∞	∞	∞
z	7	1	0

	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	3	1	0

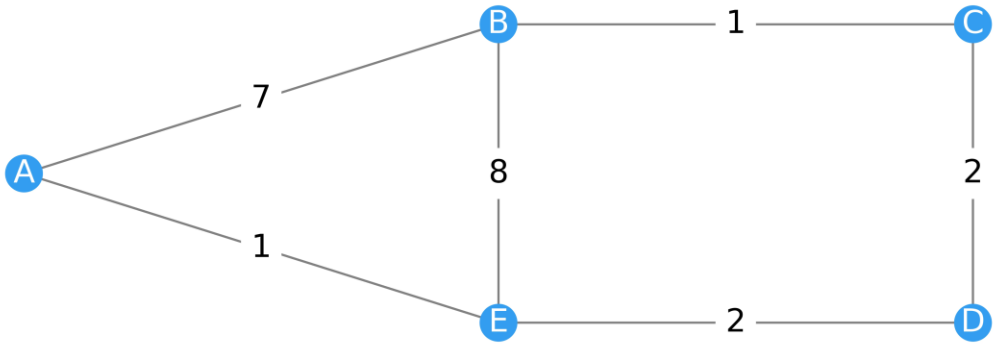
	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	3	1	0



距离向量路由选择算法

- 分布式的
  - 每个节点独立运行自己的DV算法，并与邻居节点交换DV信息
- 迭代的
  - 每个节点从邻居节点接收信息，执行计算，然后再将结果分发给邻居，这一过程重复执行很多次
- 异步的
  - 不需要所有节点步调一致

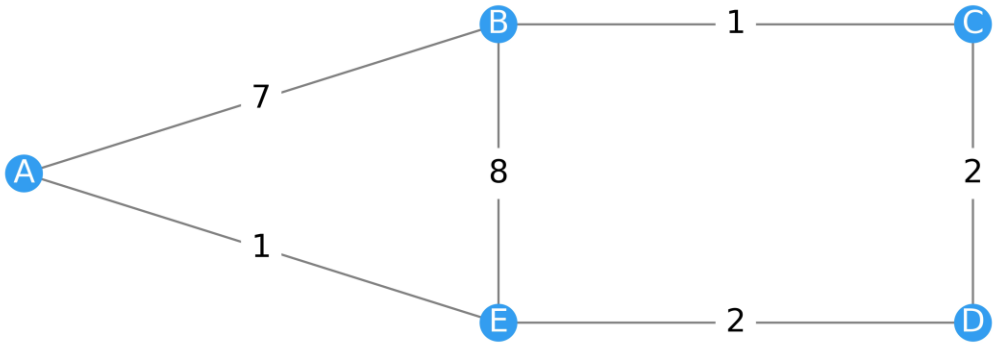
DV 算法示例一



颜色说明
路由表：
添加新条目
修改旧条目
图：
--------->
节点间传递DV

Frame 0

DV 算法示例二



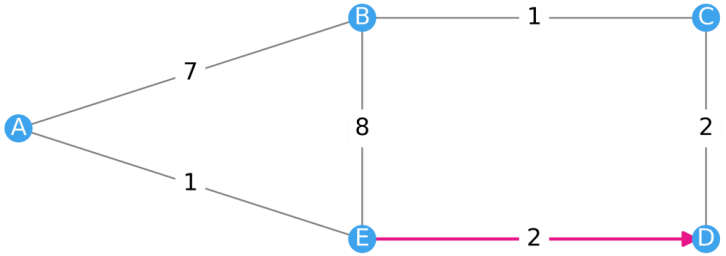
Frame 0

DV算法：殊途同归

- 对比示例一（左）和示例二（右）的第五次更新
- 可见两次运行过程不同

Node A, Round 1

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
D	**3**	**E**
E	1	E



Frame 5

Node E, Round 0

Node	Dist	Next
A	**1**	**A**
B	**8**	**B**
D	**2**	**D**
E	**0**	**E**

Node D, Round 1

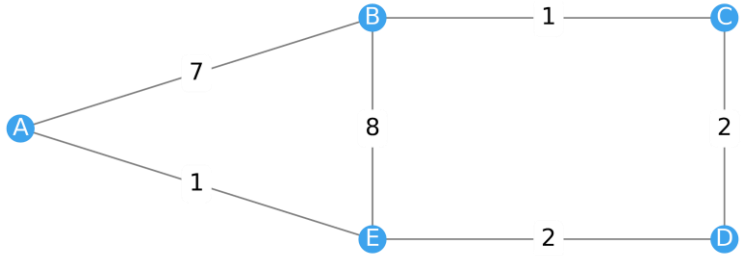
Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Node B, Round 1

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	**3**	**C**
E	8	E

Node C, Round 1

Node	Dist	Next
A	**8**	**B**
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	**9**	**B**



Frame 5

Node D, Round 0

Node	Dist	Next
C	**2**	**C**
D	**0**	**D**
E	**2**	**E**

DV算法：殊途同归

- 对比示例一（左）和示例二（右）收敛后的结果
- 可见两次运行结果相同

Node A, Round 6

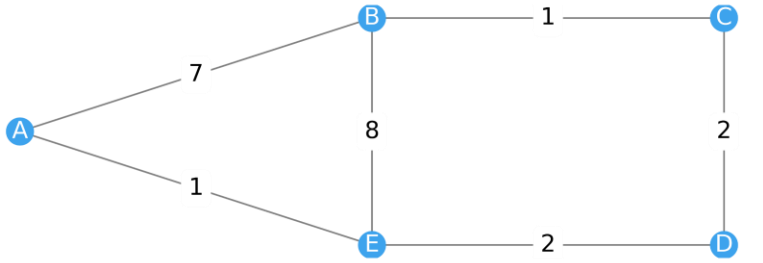
Node	Dist	Next
A	0	A
B	**6**	**E**
C	5	E
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 8

Node	Dist	Next
A	**6**	**C**
B	0	B
C	1	C
D	3	C
E	5	C

Node C, Round 2

Node	Dist	Next
A	**5**	**D**
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	4	D



Node E, Round 8

Node	Dist	Next
A	1	A
B	**5**	**D**
C	4	D
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 3

Node	Dist	Next
A	3	E
B	**3**	**C**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 18

Node A, Round 8

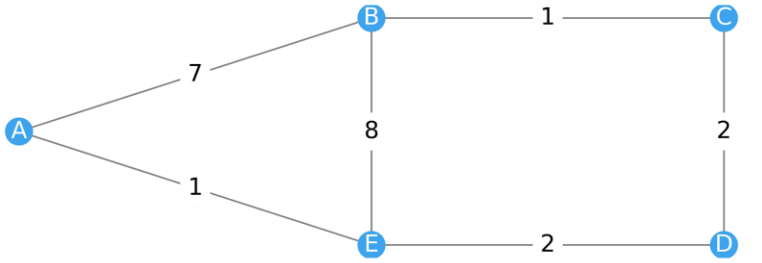
Node	Dist	Next
A	0	A
B	**6**	**E**
C	5	E
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 6

Node	Dist	Next
A	**6**	**C**
B	0	B
C	1	C
D	3	C
E	5	C

Node C, Round 7

Node	Dist	Next
A	**5**	**D**
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	4	D



Node E, Round 4

Node	Dist	Next
A	1	A
B	**5**	**D**
C	4	D
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 3

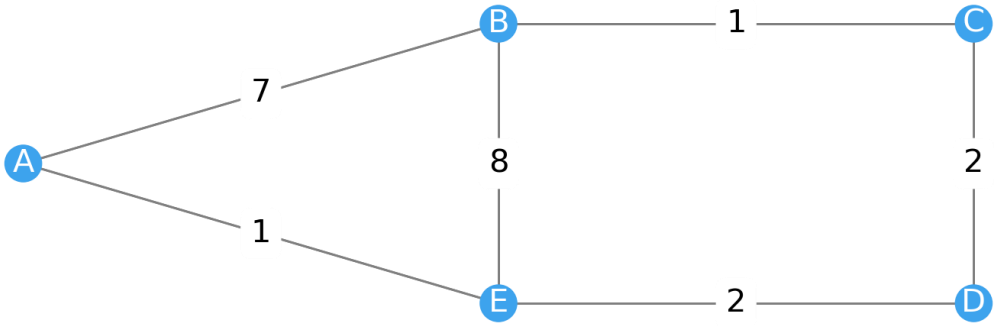
Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	3	C
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 22

DV 算法示例

- python 实现DV算法
- 每个节点运行一个进程
- 动态显示每个节点的路由表
- 使用multiprocessing实现多进程，matplotlib绘图，matplotlib.animation实现动画
- 大概300行代码
- 感兴趣，你也可以试试看

DV 算法示例一：分解

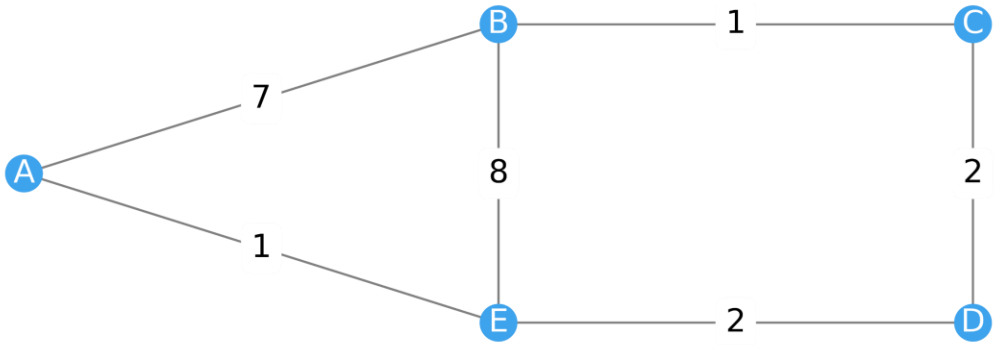


Frame 0

DV 算法示例（1）

Node A, Round 0

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
E	1	E

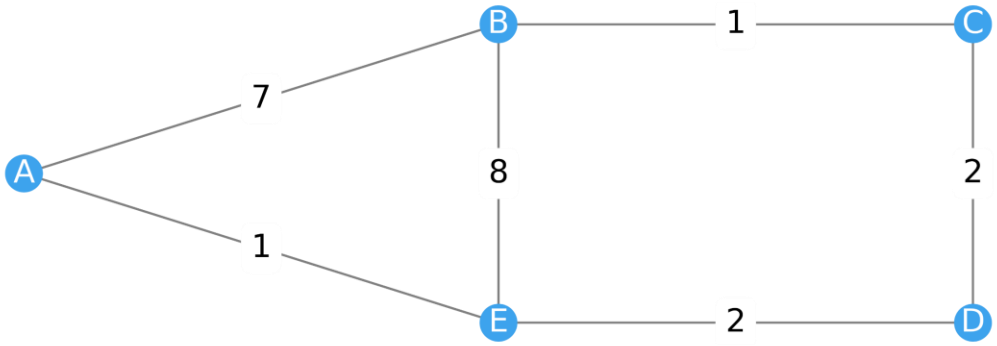


Frame 1

DV 算法示例（2）

Node A, Round 0

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
E	1	E



Node D, Round 0

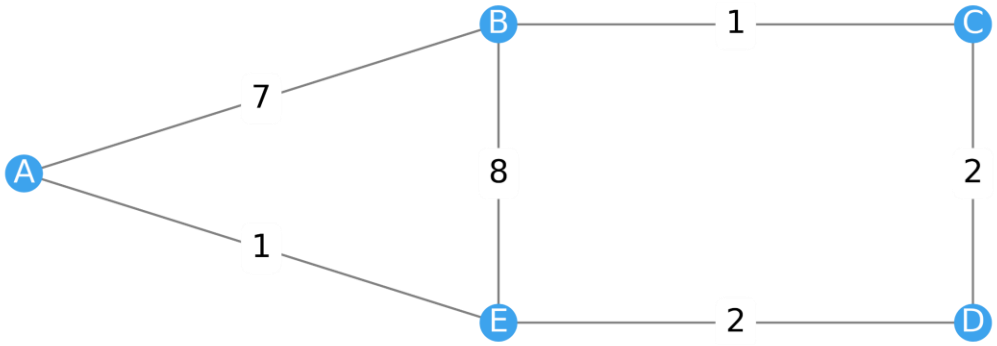
Node	Dist	Next
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 2

DV 算法示例（3）

Node A, Round 0

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
E	1	E



Node E, Round 0

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	B
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 0

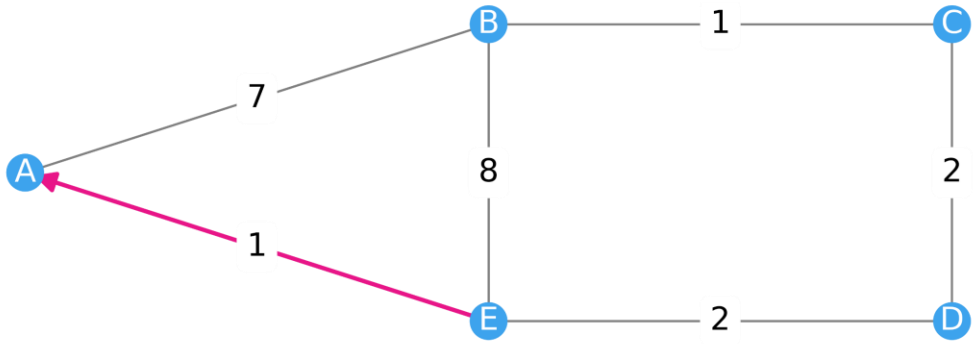
Node	Dist	Next
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 3

DV 算法示例（4）

Node A, Round 1

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
D	**3**	**E**
E	1	E



Node E, Round 0

Node	Dist	Next
A	**1**	**A**
B	**8**	**B**
D	**2**	**D**
E	**0**	**E**

Node D, Round 0

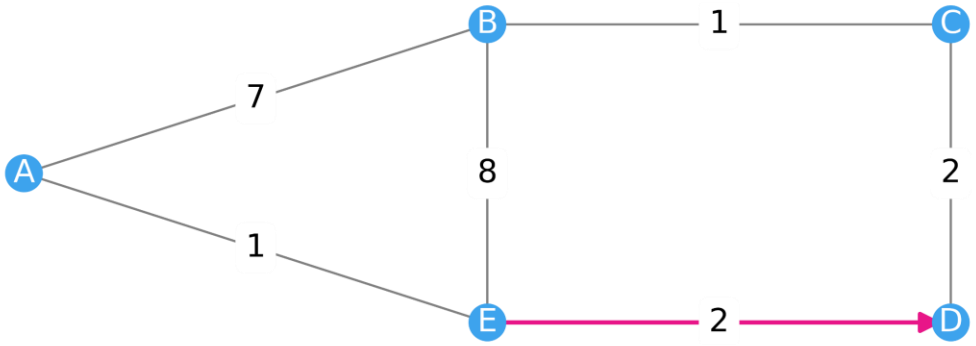
Node	Dist	Next
C	**2**	**C**
D	**0**	**D**
E	**2**	**E**

Frame 4

DV 算法示例（5）

Node A, Round 1

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
D	**3**	**E**
E	1	E



Node E, Round 0

Node	Dist	Next
A	**1**	**A**
B	**8**	**B**
D	**2**	**D**
E	**0**	**E**

Node D, Round 1

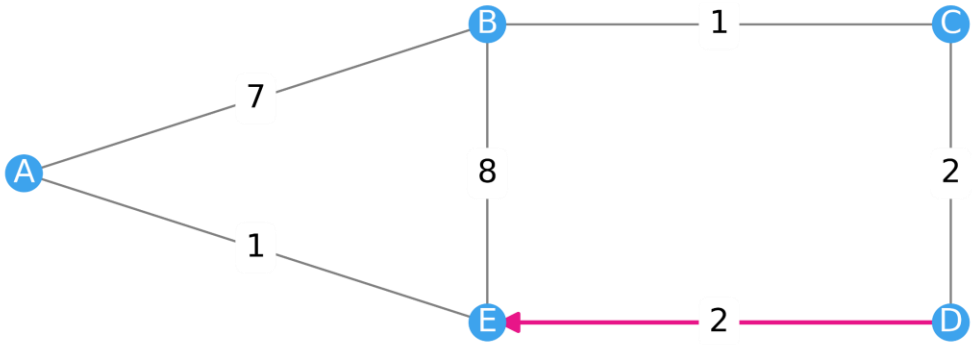
Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 5

DV 算法示例（6）

Node A, Round 1

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
D	**3**	**E**
E	1	E



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 1

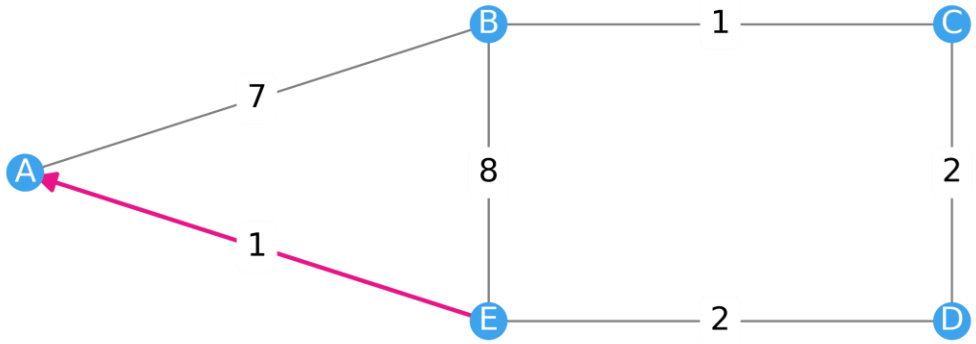
Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 6

DV 算法示例（7）

Node A, Round 2

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 1

Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 7

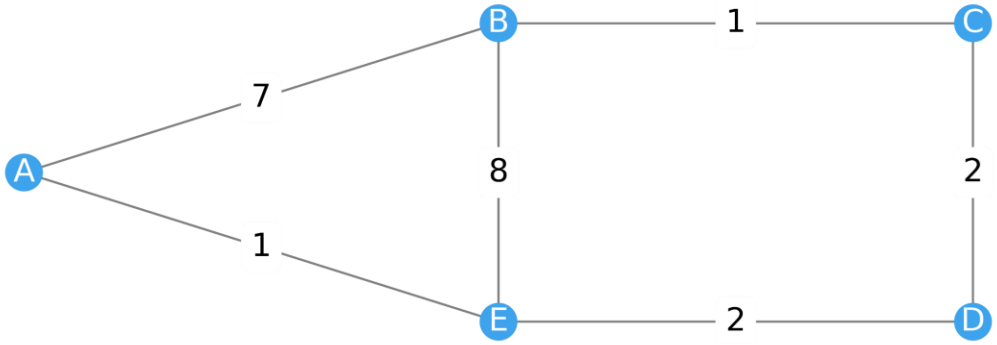
DV 算法示例（8）

Node A, Round 2

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 0

Node	Dist	Next
A	**7**	**A**
B	**0**	**B**
C	**1**	**C**
E	**8**	**E**



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 1

Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 8

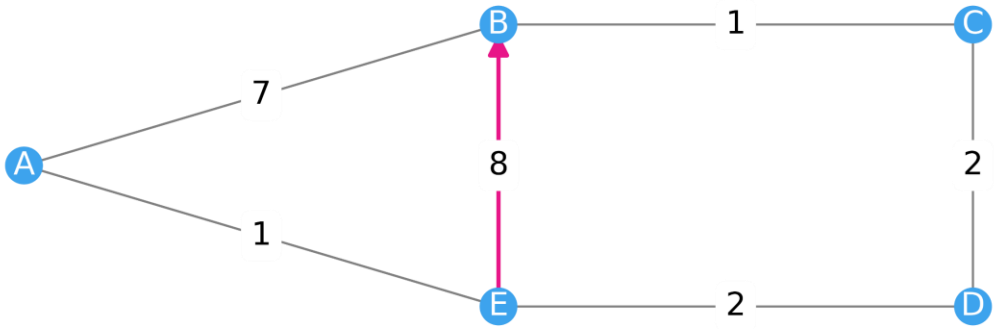
DV 算法示例（9）

Node A, Round 2

Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 2

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	**10**	**E**
E	8	A



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 1

Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 9

DV 算法示例（10）

Node A, Round 2

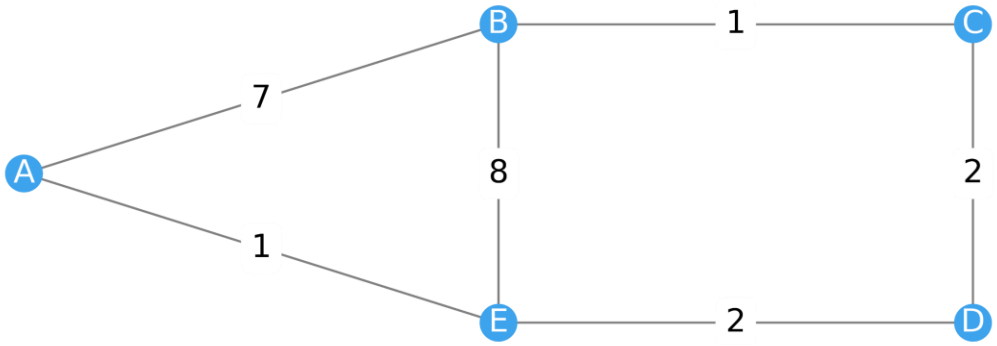
Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 2

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	**10**	**E**
E	8	A

Node C, Round 0

Node	Dist	Next
B	**1**	**B**
C	**0**	**C**
D	**2**	**D**



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 1

Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 10

DV 算法示例（11）

Node A, Round 2

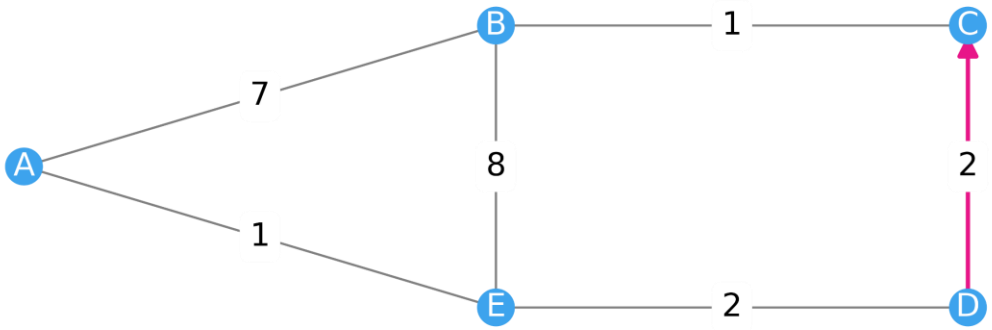
Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 2

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	**10**	**E**
E	8	A

Node C, Round 1

Node	Dist	Next
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	**4**	**D**



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 1

Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 11

DV 算法示例（12）

Node A, Round 2

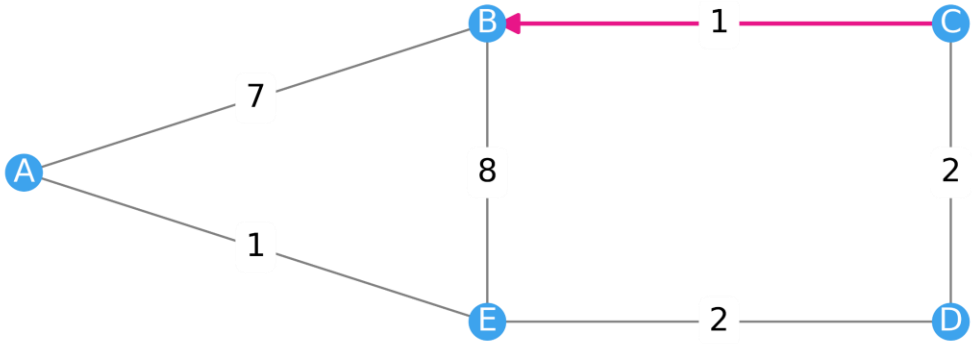
Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 6

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	**3**	**C**
E	8	A

Node C, Round 1

Node	Dist	Next
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	**4**	**D**



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 1

Node	Dist	Next
A	**3**	**E**
B	**10**	**E**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 12

DV 算法示例（13）

Node A, Round 2

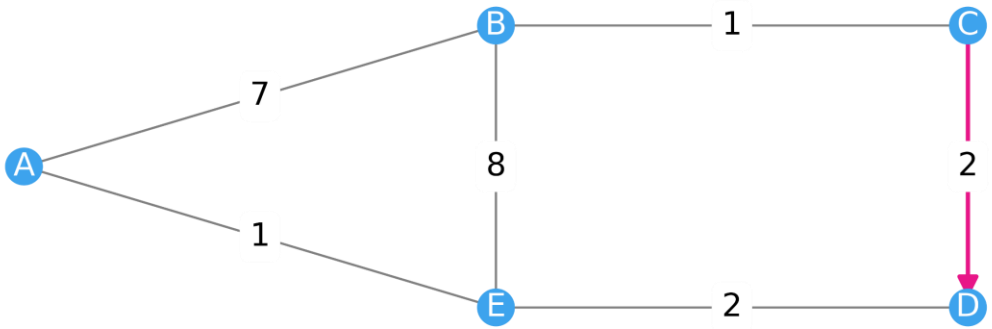
Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 6

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	**3**	**C**
E	8	A

Node C, Round 1

Node	Dist	Next
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	**4**	**D**



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 3

Node	Dist	Next
A	3	E
B	**3**	**C**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 13

DV 算法示例（14）

Node A, Round 2

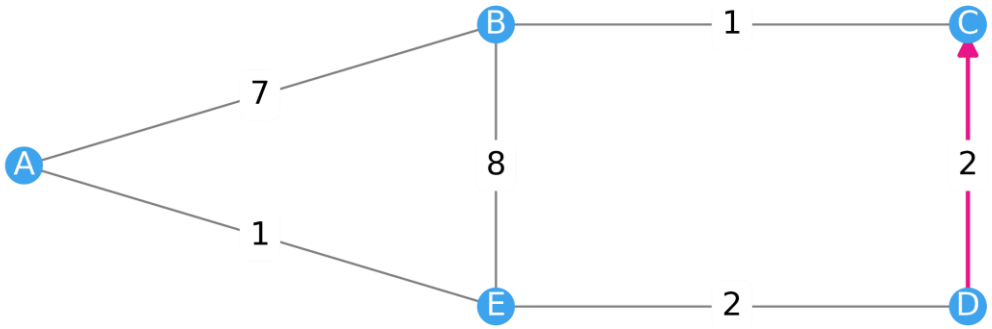
Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 6

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	**3**	**C**
E	8	A

Node C, Round 2

Node	Dist	Next
A	**5**	**D**
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	4	D



Node E, Round 2

Node	Dist	Next
A	1	A
B	8	A
C	**4**	**D**
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 3

Node	Dist	Next
A	3	E
B	**3**	**C**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 14

DV 算法示例（15）

Node A, Round 2

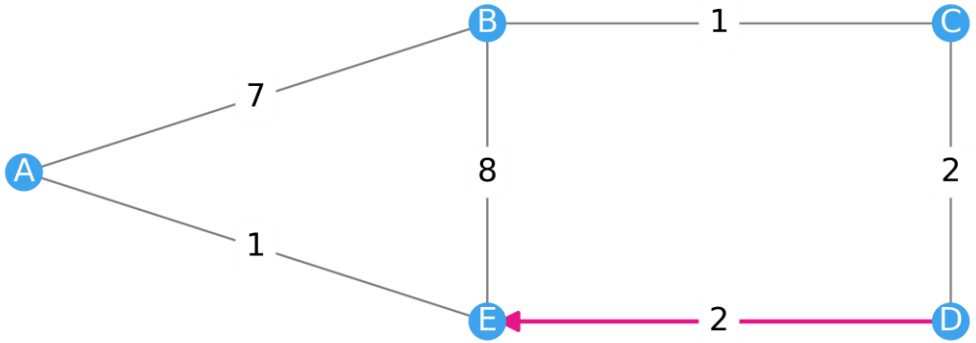
Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 6

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	**3**	**C**
E	8	A

Node C, Round 2

Node	Dist	Next
A	**5**	**D**
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	4	D



Node E, Round 8

Node	Dist	Next
A	1	A
B	**5**	**D**
C	4	D
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 3

Node	Dist	Next
A	3	E
B	**3**	**C**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 15

DV 算法示例（16）

Node A, Round 2

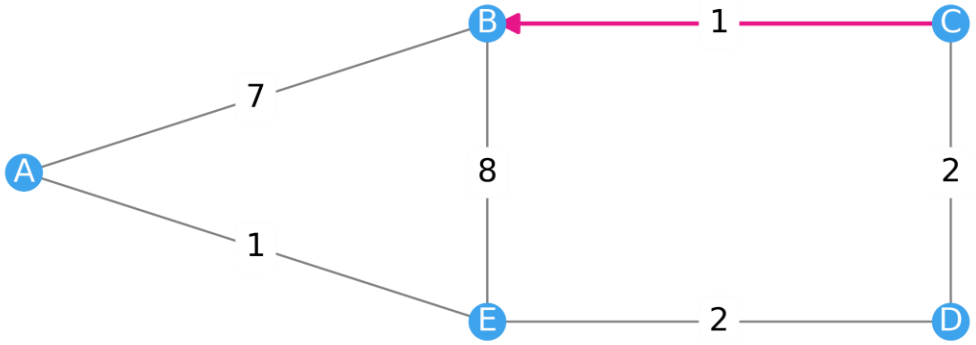
Node	Dist	Next
A	0	A
B	7	B
C	**5**	**E**
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 7

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	3	C
E	**5**	**C**

Node C, Round 2

Node	Dist	Next
A	**5**	**D**
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	4	D



Node E, Round 8

Node	Dist	Next
A	1	A
B	**5**	**D**
C	4	D
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 3

Node	Dist	Next
A	3	E
B	**3**	**C**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 16

DV 算法示例（17）

Node A, Round 6

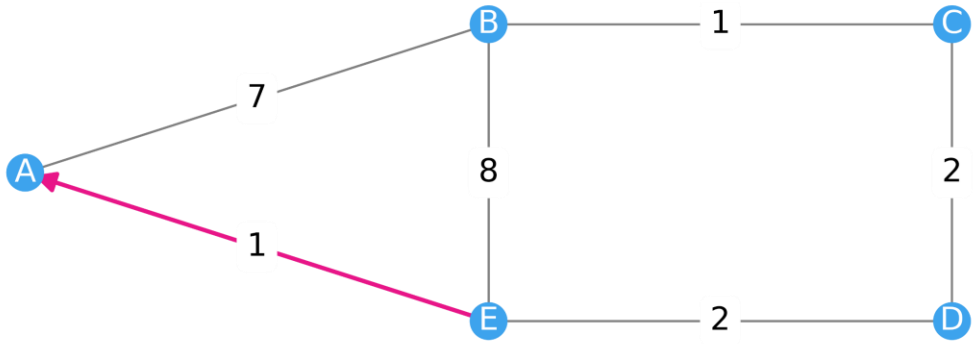
Node	Dist	Next
A	0	A
B	**6**	**E**
C	5	E
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 7

Node	Dist	Next
A	7	A
B	0	B
C	1	C
D	3	C
E	**5**	**C**

Node C, Round 2

Node	Dist	Next
A	**5**	**D**
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	4	D



Node E, Round 8

Node	Dist	Next
A	1	A
B	**5**	**D**
C	4	D
D	2	D
E	0	E

Node D, Round 3

Node	Dist	Next
A	3	E
B	**3**	**C**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 17

DV 算法示例（18）

Node A, Round 6

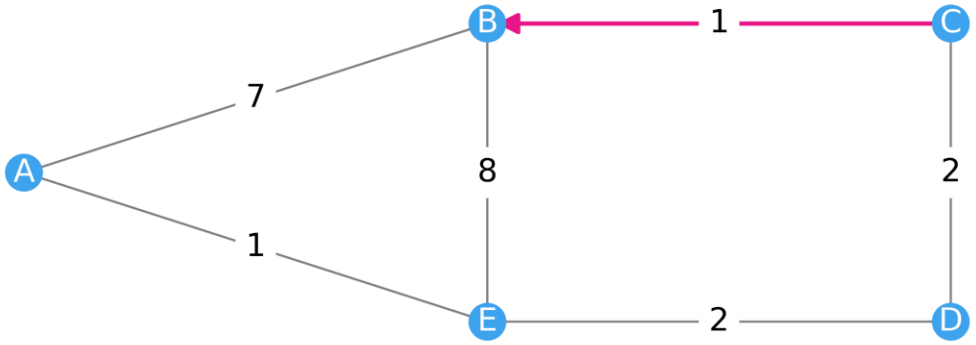
Node	Dist	Next
A	0	A
B	**6**	**E**
C	5	E
D	3	E
E	1	E

Node B, Round 8

Node	Dist	Next
A	**6**	**C**
B	0	B
C	1	C
D	3	C
E	5	C

Node C, Round 2

Node	Dist	Next
A	**5**	**D**
B	1	B
C	0	C
D	2	D
E	4	D



Node E, Round 8

Node	Dist	Next
A	1	A
B	**5**	**D**
C	4	D
D	2	D
E	0	E

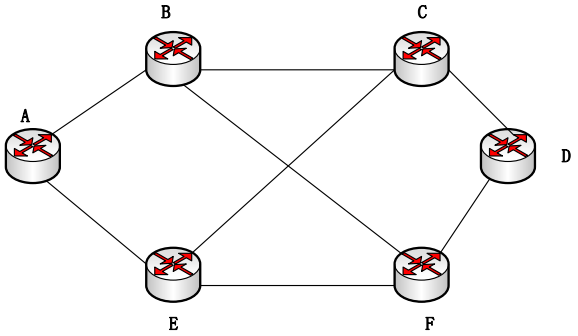
Node D, Round 3

Node	Dist	Next
A	3	E
B	**3**	**C**
C	2	C
D	0	D
E	2	E

Frame 18

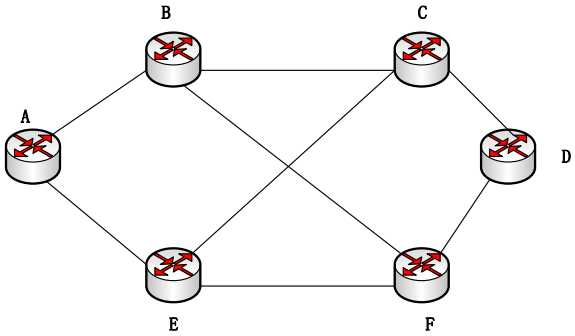
习题

- 考虑如下图所示的采用基于距离-矢量的路由选择算法的子网。假设路由器C刚启动，并测得到它的邻接路由器B、D和E的时延分别是4、5和6。此后，路由器C依次收到下列矢量：来自D的(10,8,5,0,8,9)、来自E的(7,5,3,7,0,3)以及来自B的(5,0,6,10,6,3)。上面的矢量表示的是发送该矢量的结点分别与结点A、B、C、D、E、F的延时。路由器C在收到3个矢量之后的新路由表是什么？



习题

目的路由器	最短距离估计	下一跳路由器
A	min(4 + 5, 5 + 10, 6 + 7) = 9	B
B	min(4 + 0, 5 + 8, 6 + 5) = 4	B
C	0	--
D	min(4 + 10, 5 + 0, 6 + 7) = 5	D
E	min(4 + 6, 5 + 8, 6 + 0) = 6	E
F	min(4 + 3, 5 + 9, 6 + 3) = 7	B



习题

- 注意：
- 1、搞清楚什么是距离向量（估计）
- $\boldsymbol{D}_C = [D_C(A), D_C(B), D_C(C), D_C(D), D_C(E), D_C(F)]$
- 其中既包含到相邻节点的距离，也包含到非相邻节点的距离。“相邻节点有哪些”是自己观测出的。而“非相邻节点有哪些”是靠“传八卦”知道的。
- 2、本题中只要求算节点C的路由表。其他节点的路由表是不要求算的，题目也没有提供足够的信息。

第四章知识点汇总

- 理解DV算法的运行原理
- 理解DV算法的特点

控制平面讲解内容

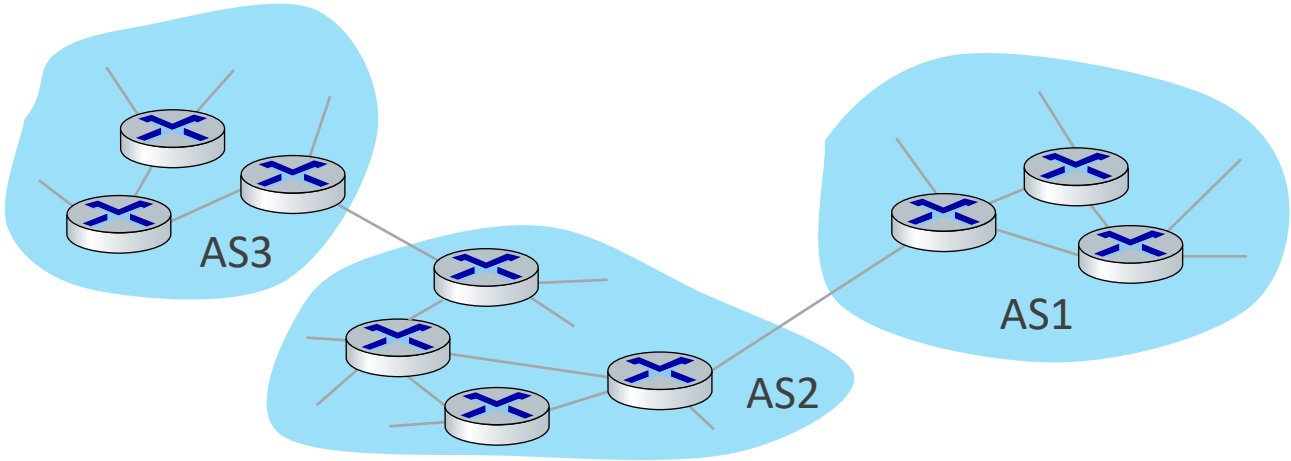
- 路由协议的目的与算法分类
- 距离向量路由选择算法
- 可扩展的路由选择
- AS内路由协议：OSPF
- AS间路由协议：BGP
- ICMP协议

路由选择

- 理想化的LS算法和DV算法不适用于实际情况
- 管理自治
  - 因特网是ISP的网络
  - ISP按照自己的意愿管理网络，运行自己选择的路由选择算法
  - ISP希望对外隐藏网络内部结构
  - ISP希望保护网络免受攻击
- 规模
  - 网络规模越大，广播链路信息的代价越大，时间越久
  - 网络规模越大，迭代的DV算法收敛越慢

可扩展的路由

- 将路由器组织成自治系统（Autonomous System）
- 一个ISP构成一个AS
- 一个ISP将其网络划分成多个AS



AS 小知识

CIDR REPORT for 24 May 21

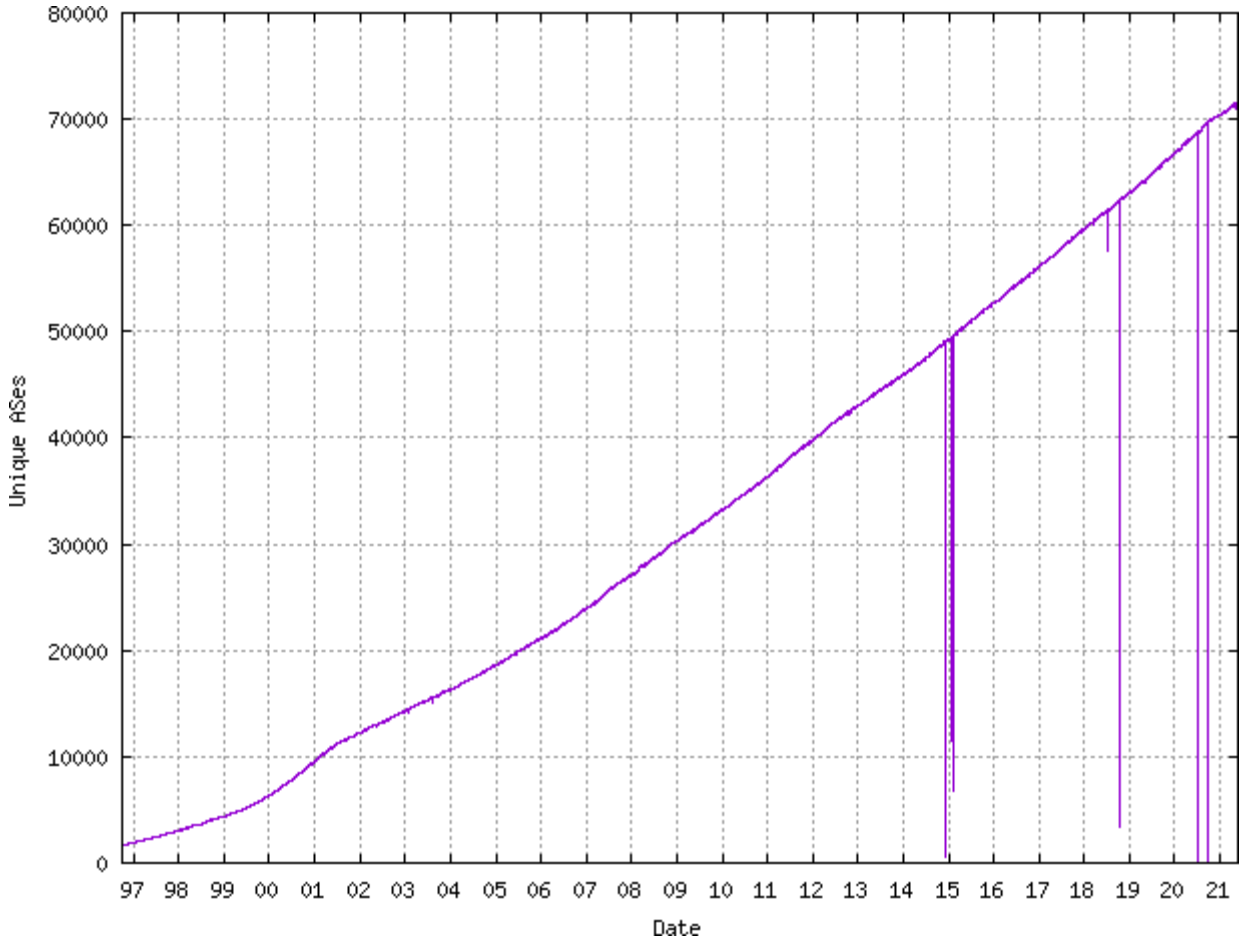
This report was generated at Mon May 24 03:14:39 2021 AEST.

AS Summary

71543	Number of ASes in routing system
25075	Number of ASes announcing only one prefix
8605	Largest number of prefixes announced by an AS AS8151: Uninet S.A. de C.V., MX
178348544	Largest address span announced by an AS (/32s) AS8003: GRS-DOD, US

https://www.cidr-report.org/as2.0/

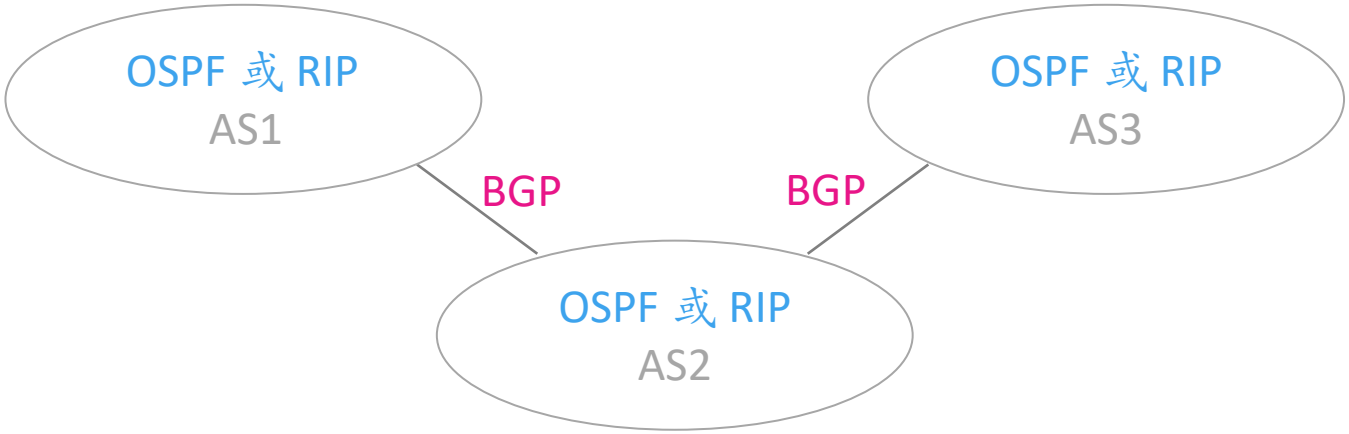
AS 小知识



CIDR REPORT for 24 May 21 https://www.cidr-report.org/as2.0/

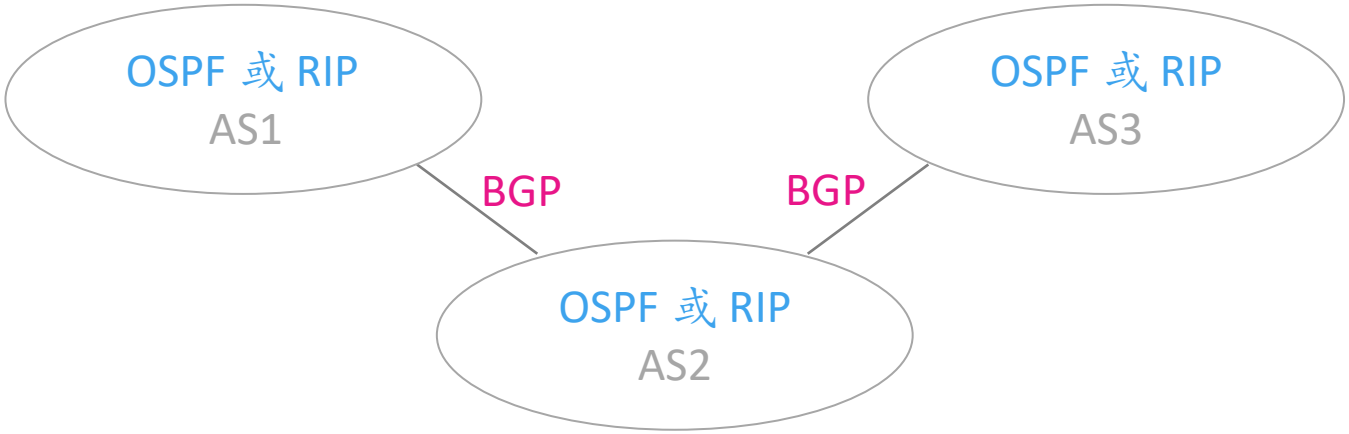
可扩展的路由

- AS内路由选择协议
  - 不同的AS可以选择不同的域内路由协议
  - 例如：OSPF，RIP
    - OSPF：Open Shortest Path First (链路状态路由算法)
    - RIP：Routing Information Protocol (距离向量路由算法)



可扩展的路由

- AS间路由选择协议
  - 当源和主机位于不同的AS时，需要AS间路由协议
  - Internet中，所有的AS运行相同的AS间路由协议：边界网关协议（Border Gateway Protocol，BGP）



第四章知识点汇总

- 了解自治系统存在的意义
- 了解AS内路由选择协议
- 了解AS间路由选择协议

控制平面讲解内容

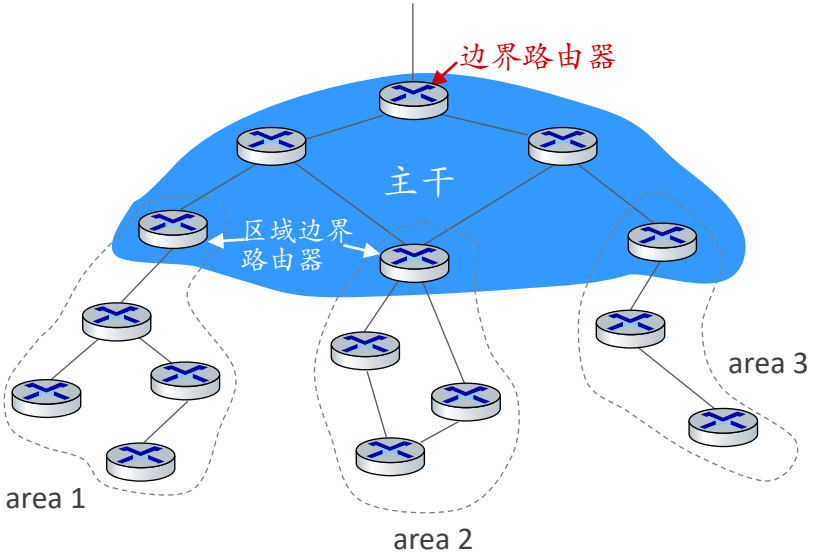
- 路由协议的目的与算法分类
- 距离向量路由选择算法
- 可扩展的路由选择
- AS内路由协议：OSPF
- AS间路由协议：BGP
- ICMP协议

OSPF(开放最短路径优先)

- 利用链路状态算法
  - 需要广播链路状态分组
  - 每个节点构建网络拓扑
  - 利用Dijkstra算法计算路由
- 路由器向AS内的所有其他路由器广播链路状态信息
  - 封装成OSPF报文，直接由IP协议承载

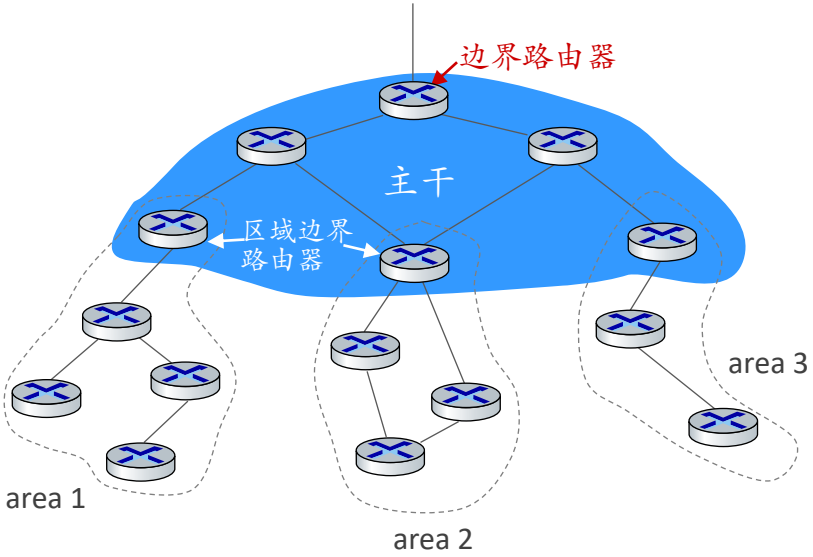
OSPF

- 两层结构：多个区域 + 一个主干



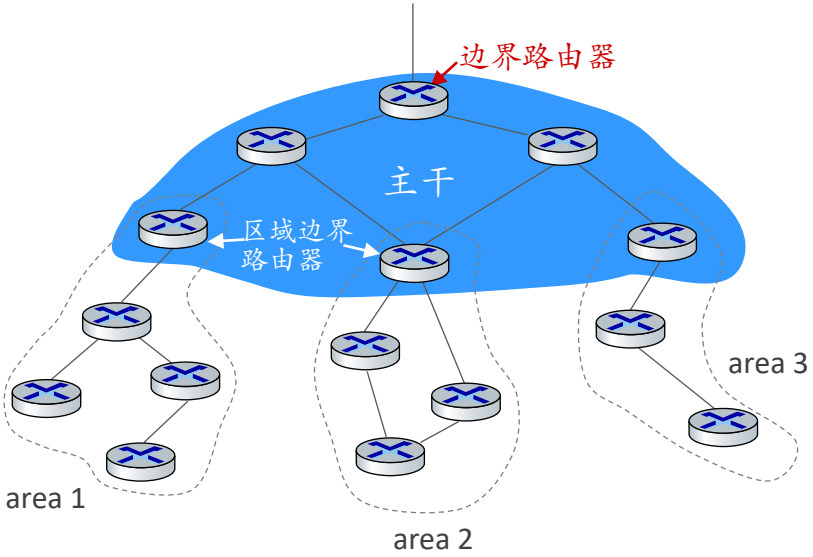
OSPF

- 两层结构：多个区域 + 一个主干
- 每个区域运行自己的OSPF协议，链路状态广播仅限于区域内
- 主干：负责区域之间的路由选择，包含所有区域边界路由器



OSPF

- 两层结构：多个区域 + 一个主干
- 区域边界路由器：负责为流向本区域外的分组提供路由选择
- 边界路由器：连接其他 AS



第四章知识点汇总

- 了解OSPF路由协议的特点

控制平面讲解内容

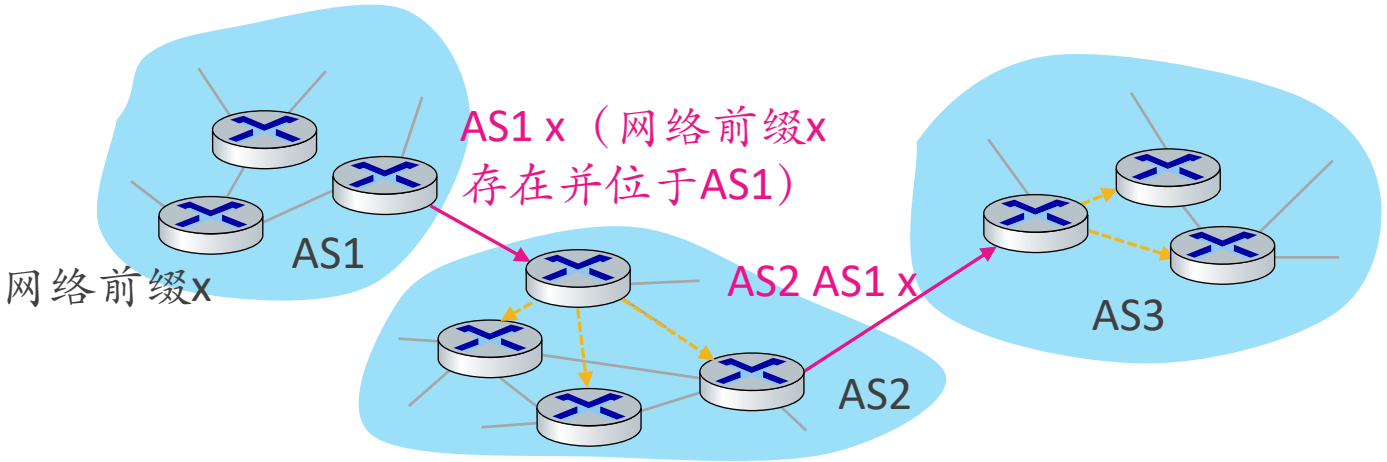
- 路由协议的目的与算法分类
- 距离向量路由选择算法
- 可扩展的路由选择
- AS内路由协议：OSPF
- AS间路由协议：BGP
- ICMP协议

AS间路由协议

- BGP： Border Gateway Protocol
  - 对于任意一个网络，BGP使得Internet上的所有AS都知道其存在并可达
  - 确定到达网络最好的路由

AS间路由协议

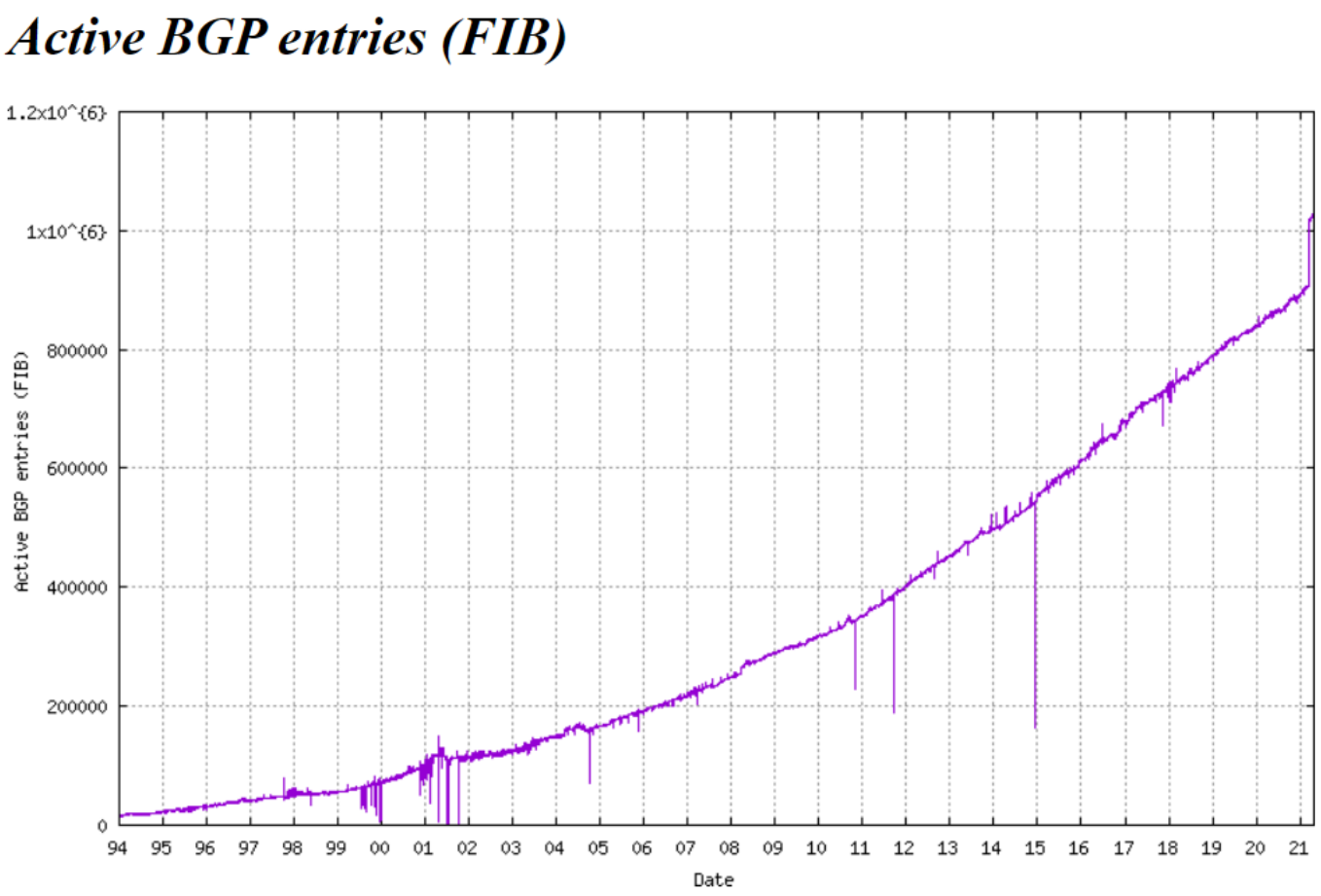
- 通告网络的存在
  - 使得网络中的所有路由器都知道网络地址x的存在以及通向x的AS路径
  - 利用TCP传输路由选择信息



AS间路由协议

- 确定到达网络最好的路由
  - 基于策略
  - 选择能尽快离开当前AS的路径
  - 会用到距离向量算法
  - 需要AS内路由信息

BGP 转发表规模



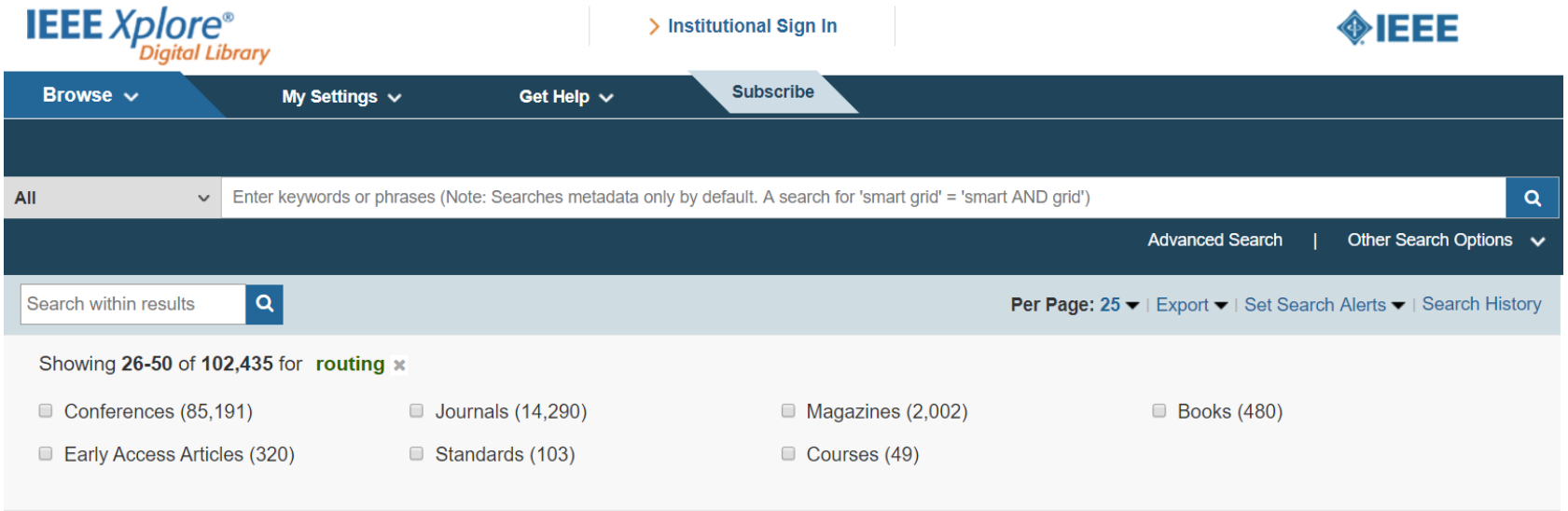
https://bgp.potaroo.net/as6447/

第四章知识点汇总

- 了解BGP中的网络通告
- 理解路由汇聚的理由

习题

- 1970-2020，为什么研究人员不断地提出新的路由选择算法?



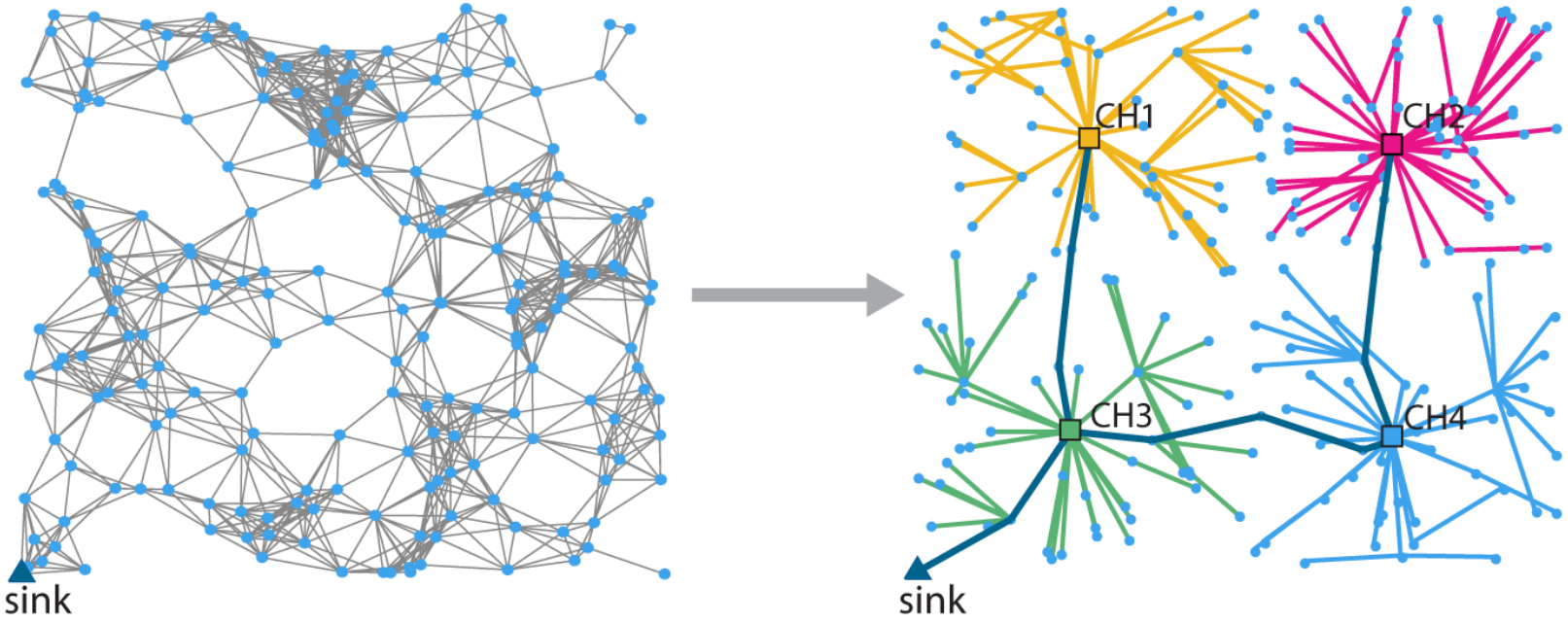
习题

806 IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS, VOL. 25, NO. 3, MARCH 2014

Transmission-Efficient Clustering Method for Wireless Sensor Networks Using Compressive Sensing

Ruitao Xie and Xiaohua Jia, *Fellow, IEEE, Computer Society*

https://rtxie.github.io/rtxie.github.io/wp-content/uploads/2017/12/cs_clustering_13.pdf



控制平面讲解内容

- 路由协议的目的与算法分类
- 距离向量路由选择算法
- 可扩展的路由选择
- AS内路由协议：OSPF
- AS间路由协议：BGP
- ICMP协议

ICMP

- Internet Control Message Protocol [RFC 792]
- 主机和路由器用来沟通网络层的信息
  - 差错报告
  - Ping程序：回显请求/应答
  - Traceroute程序
- ICMP报文由IP承载
  - IP的上层协议号为1

ICMP

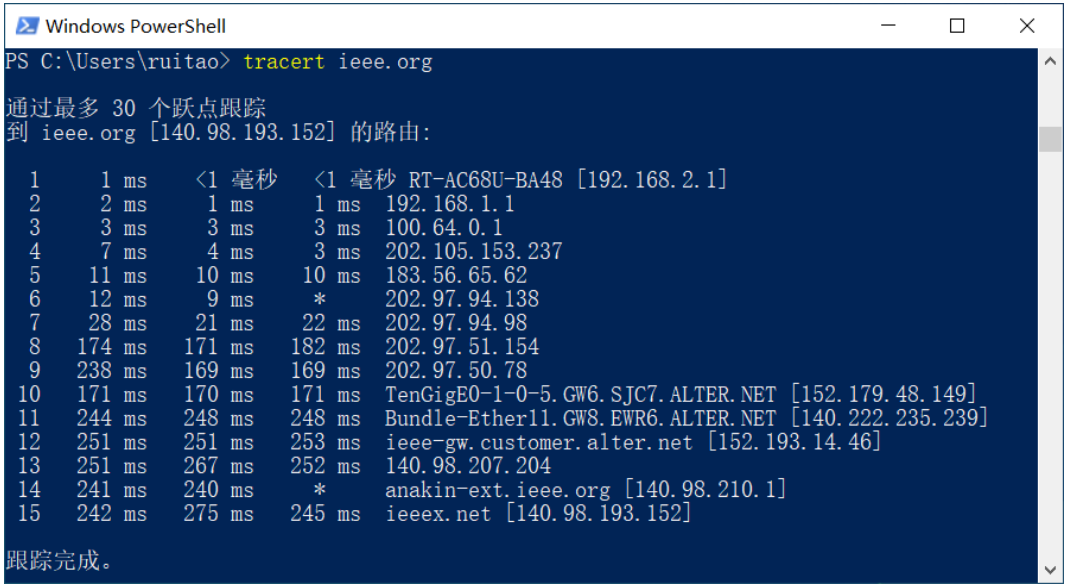
- ICMP报文
  - 类型字段
  - 编码字段
  - 应答报文还包含：引发ICMP报文生成的IP数据报的首部ICMP报文的首部和前8个字节

ICMP报文类型

ICMP类型	编码	描述
0	0	回显应答
3	0	目的网络不可达
3	1	目的主机不可达
3	2	目的协议不可达
3	3	目的端口不可达
3	6	目的网络未知
3	7	目的主机未知
4	0	源抑制
8	0	回显请求
9	0	路由器通告
10	0	路由器发现
11	0	TTL过期
12	0	IP首部损坏

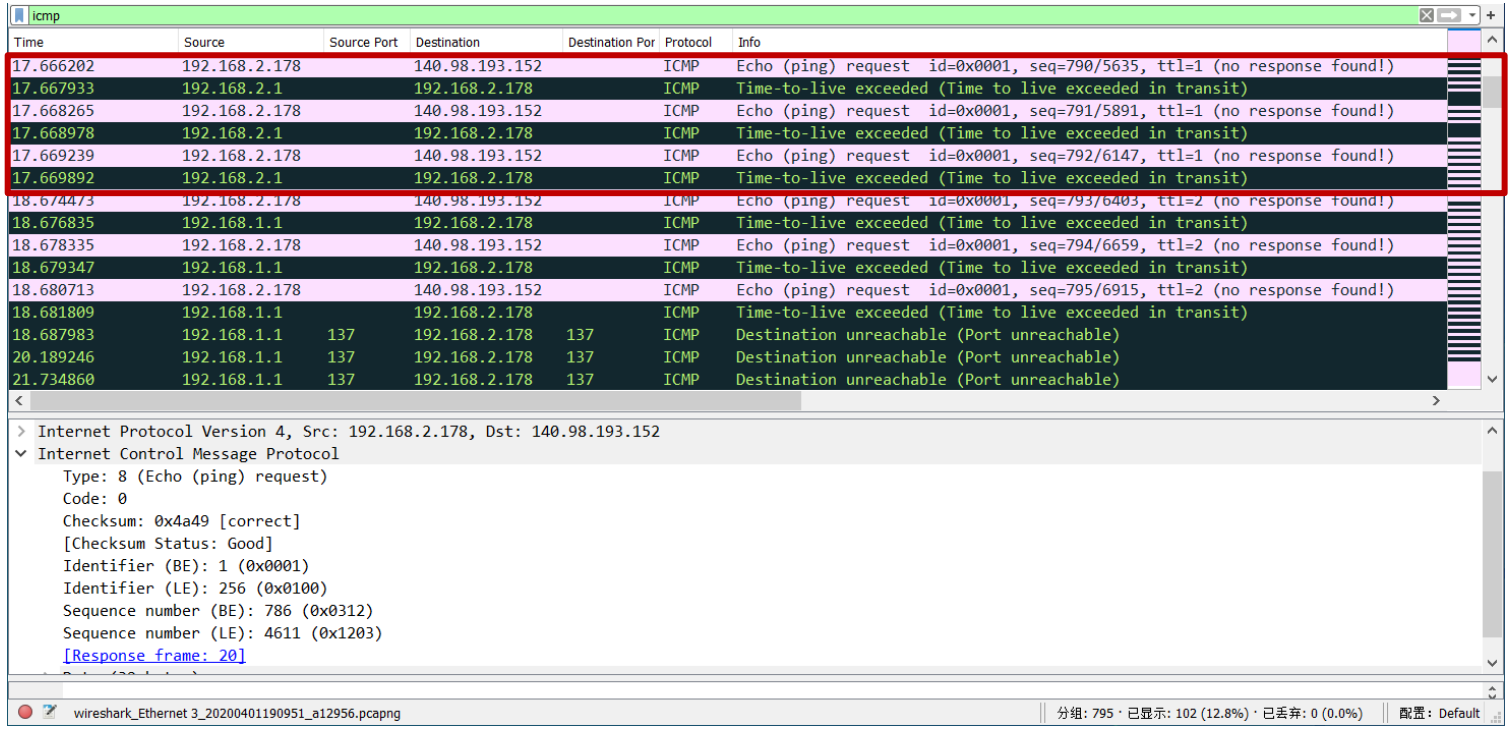
ICMP

- 利用ICMP实现Traceroute的原理



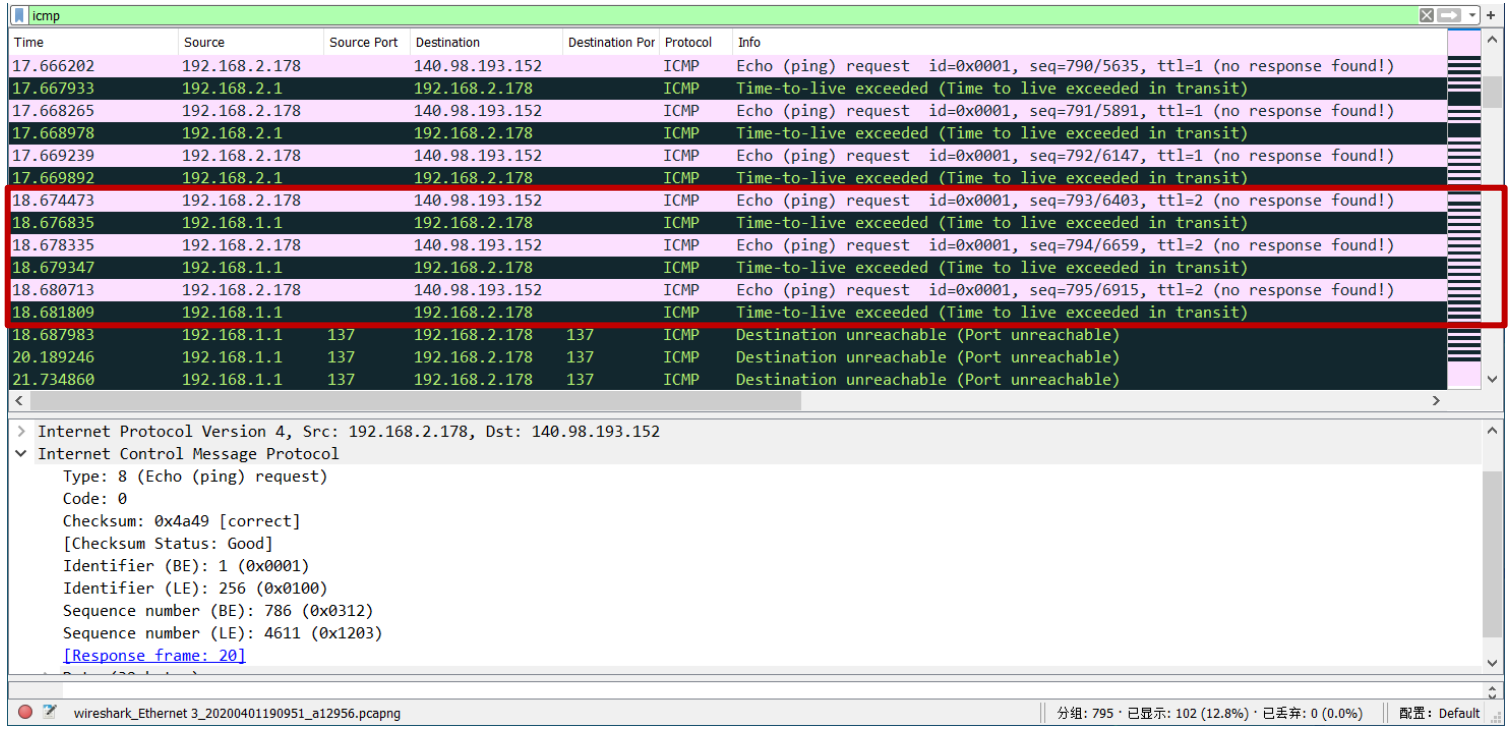
ICMP

- 源节点向目的节点发送ICMP报文（类型是回显请求），IP报文的TTL=1，重复发三次
- 到达第一个路由器时，TTL减1，为0，触发类型为TTL过期的ICMP报文。注意该报文的源地址就是该路由器。



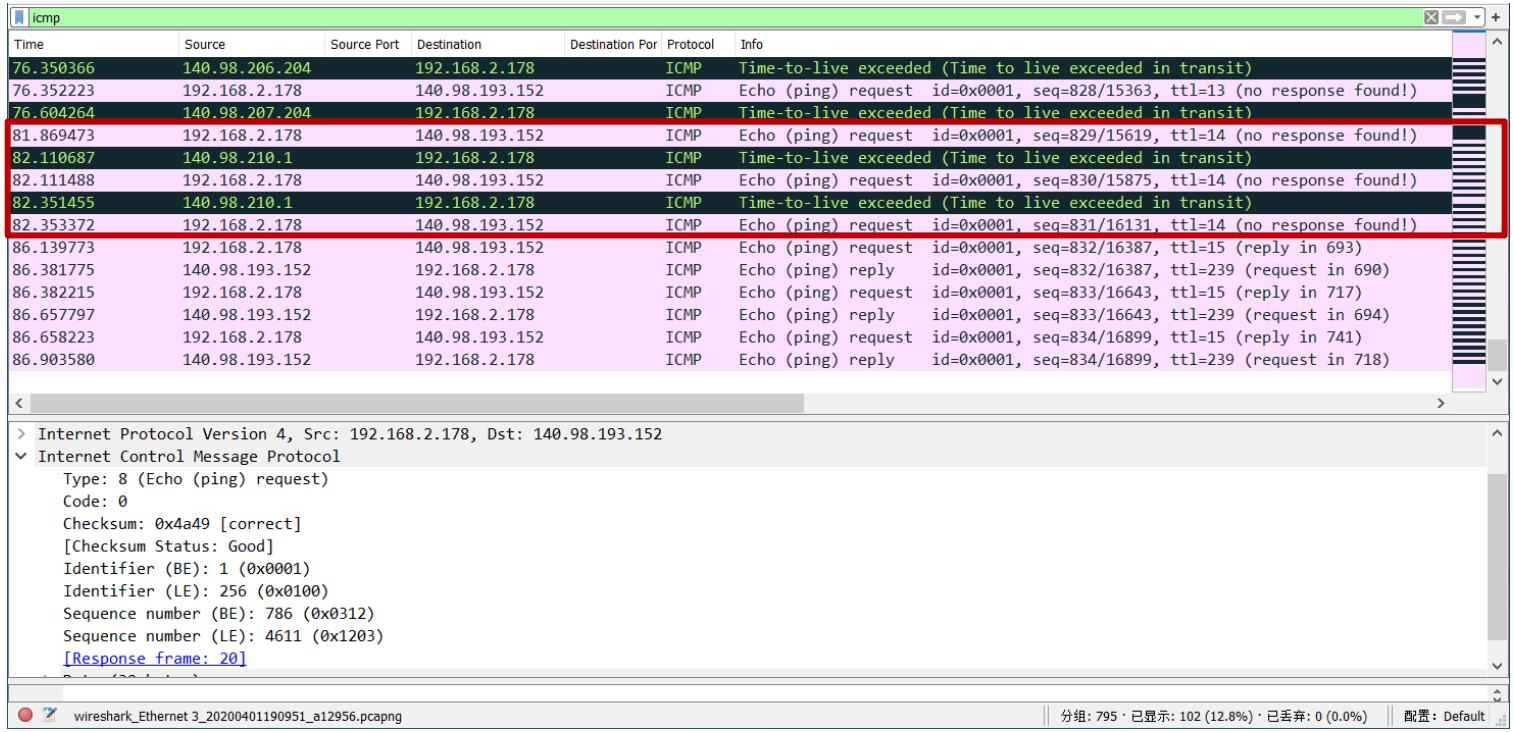
ICMP

- 源节点向目的节点发送ICMP报文（类型是回显请求），IP报文的TTL=2，重复发三次
- 到达第二个路由器时，TTL减为0，触发类型为TTL过期的ICMP报文。注意该报文的源地址就是该路由器。



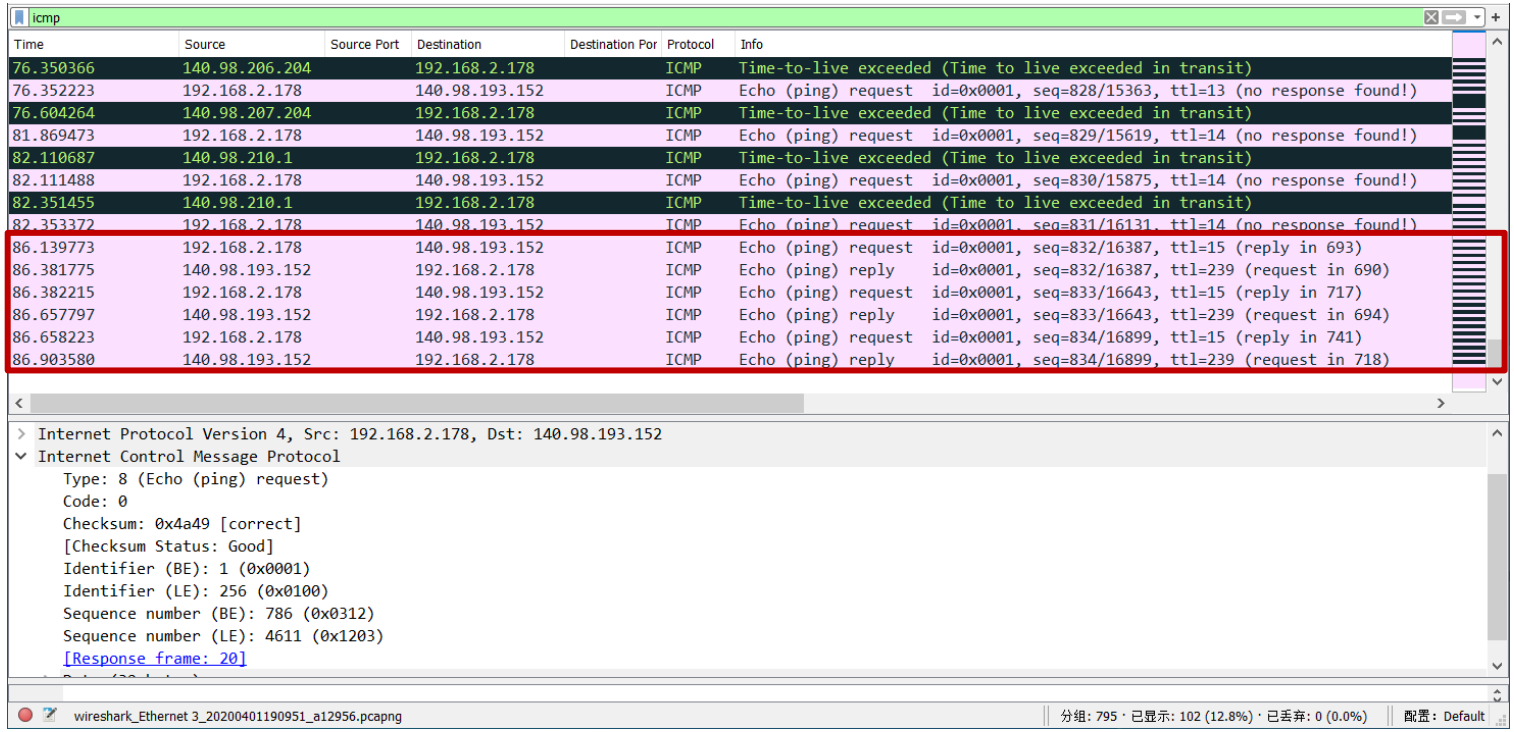
ICMP

- 有些TTL过期类型的ICMP报文丢失了，例如第14跳，发送了三个ping请求报文，只收到两个TTL过期报文。



ICMP

- 当TTL增加到一定值时，源节点到目的节点发送的ICMP回显请求类型的报文成功到达了目的节点。
- 目的节点回复ICMP回显应答类型的报文。源节点收到以后结束程序。



第四章知识点汇总

- 了解ICMP协议的用途
- 了解Traceroute程序实现的原理

If you shut your door to all errors truth will be shut out.
如果你把所有的错误都关在门外，
真理也要被关在门外了。

——*Tagore*