

计算机网络

第四章 网络层

谢瑞桃

xie@szu.edu.cn

[rtxie.github.io](https://github.com/rtxie)

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

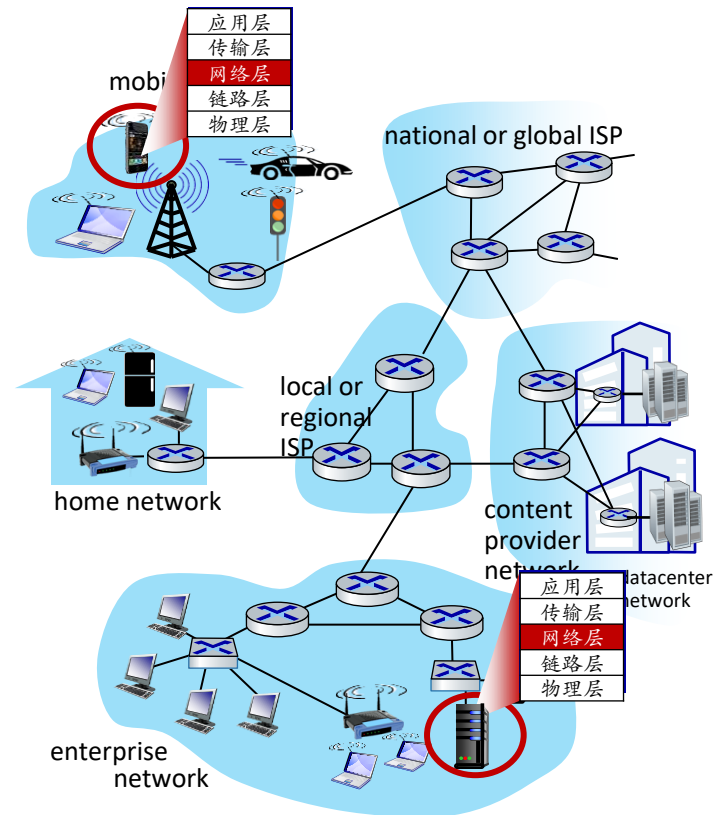


数据平面讲解内容

- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6

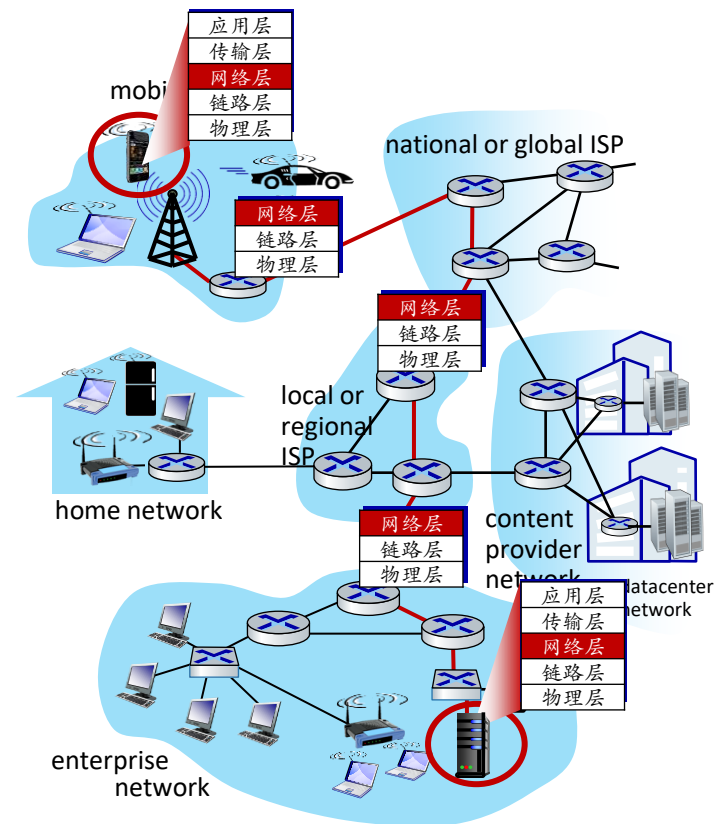
网络层

- 从发送主机向接收主机运送传输层的报文段
- 发送方将其封装数据报，接收方解封装



网络层

- 从发送主机向接收主机运送传输层的报文段
- 发送方将其封装**数据报**，接收方解封装
- 网络层协议运行在所有主机和**路由器**上
- 路由器查看IP数据报首部，从而决定如何转发





网络层的功能

■ 转发

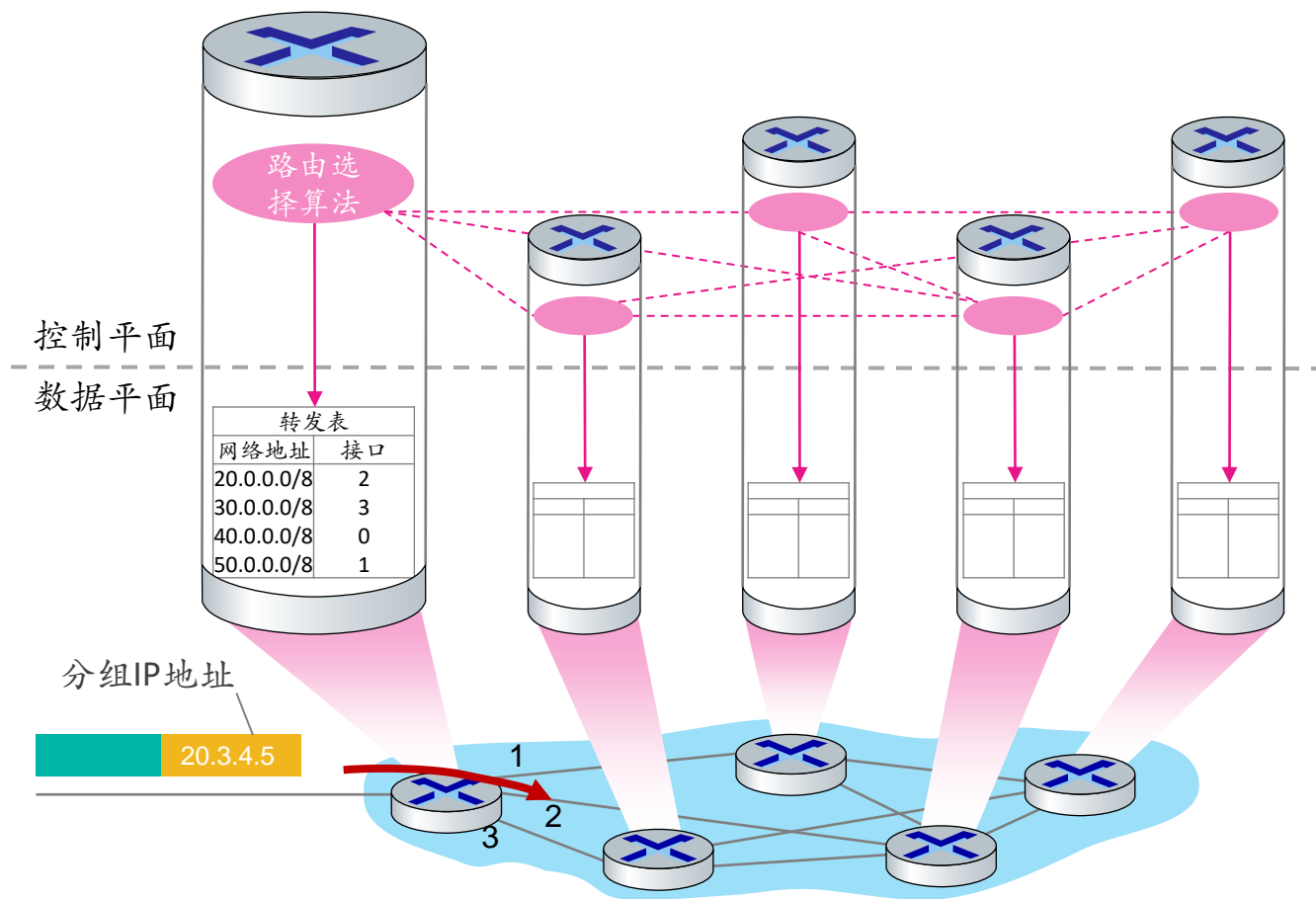
- 路由器将分组由一条输入链路移动到适当的输出链路
- 时间要求是纳秒级别
- 由硬件实现

■ 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





第四章知识点汇总

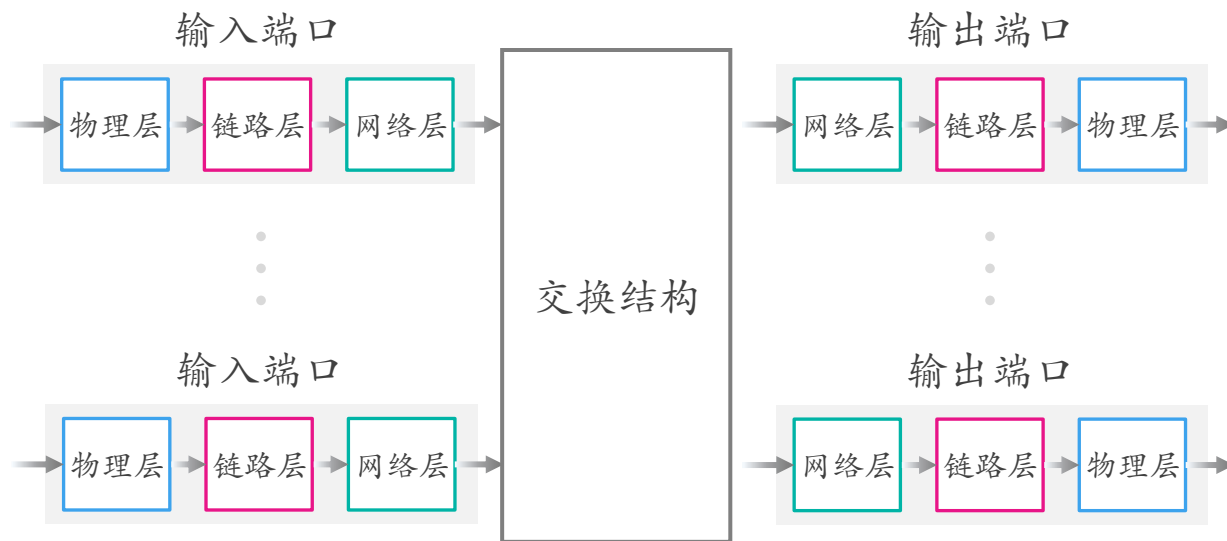
- 理解网络层在协议栈中的作用
- 了解网络层的功能：转发和路由选择



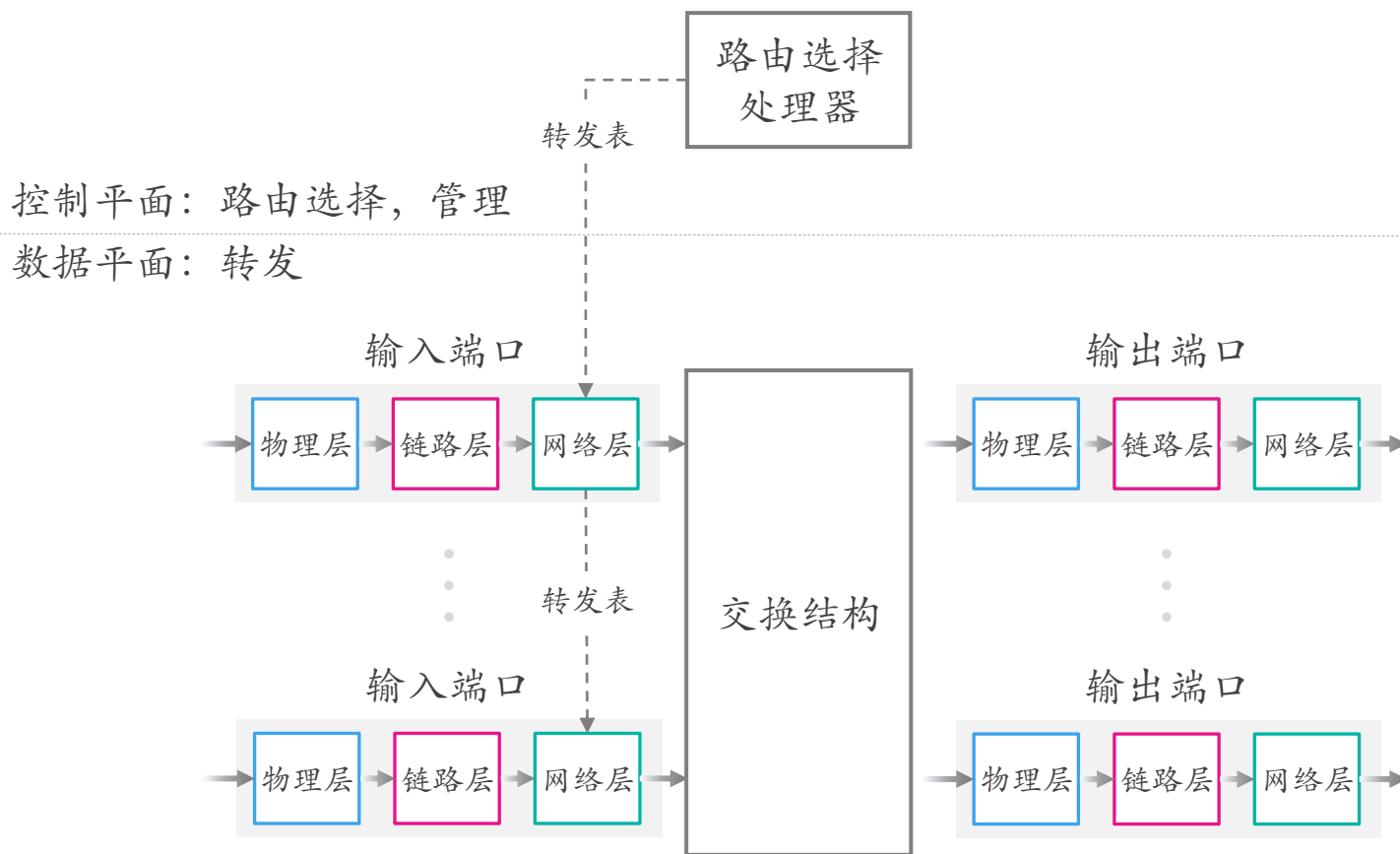
数据平面讲解内容

- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6

路由器体系结构



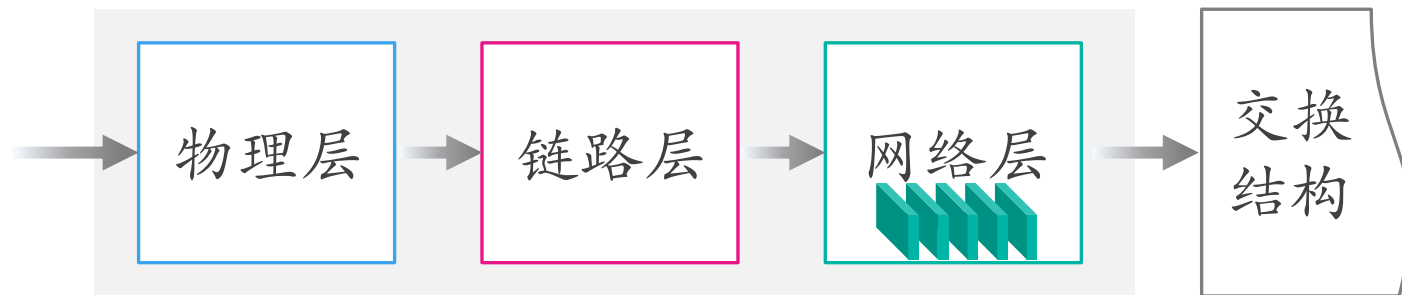
路由器体系结构



输入端口

■ 网络层：

- 查找转发表
- 转发
- 如果交换结构不能很快（相对输入链路速度而言）地将到达分组转移到输出接口，则会出现排队

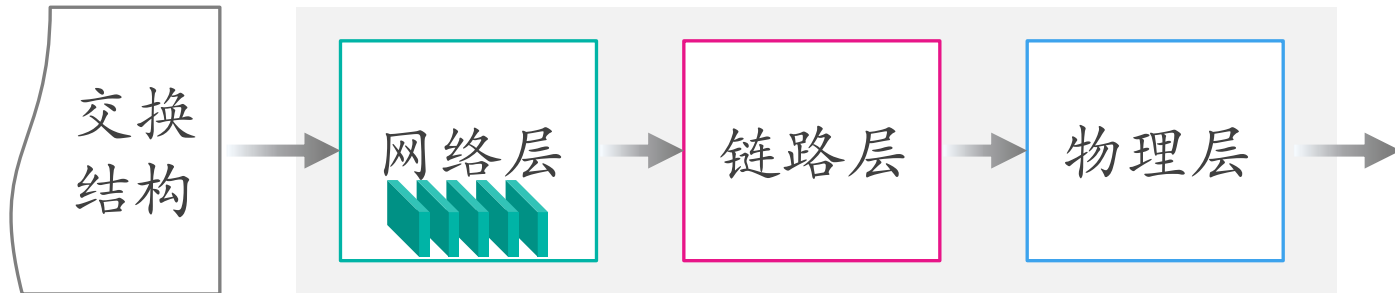




输出端口

■ 网络层:

- 如果数据报到达输出端口的速度快于离开端口的速度（链路发送速度），则需要队列
- 数据报会因为队列溢出而被丢弃
- 丢包和排队时延因此而产生





第四章知识点汇总

- 了解路由器的体系结构
- 了解路由器的输入/输出端口的作用
- 理解丢包与排队时延产生的原因



数据平面讲解内容

- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6

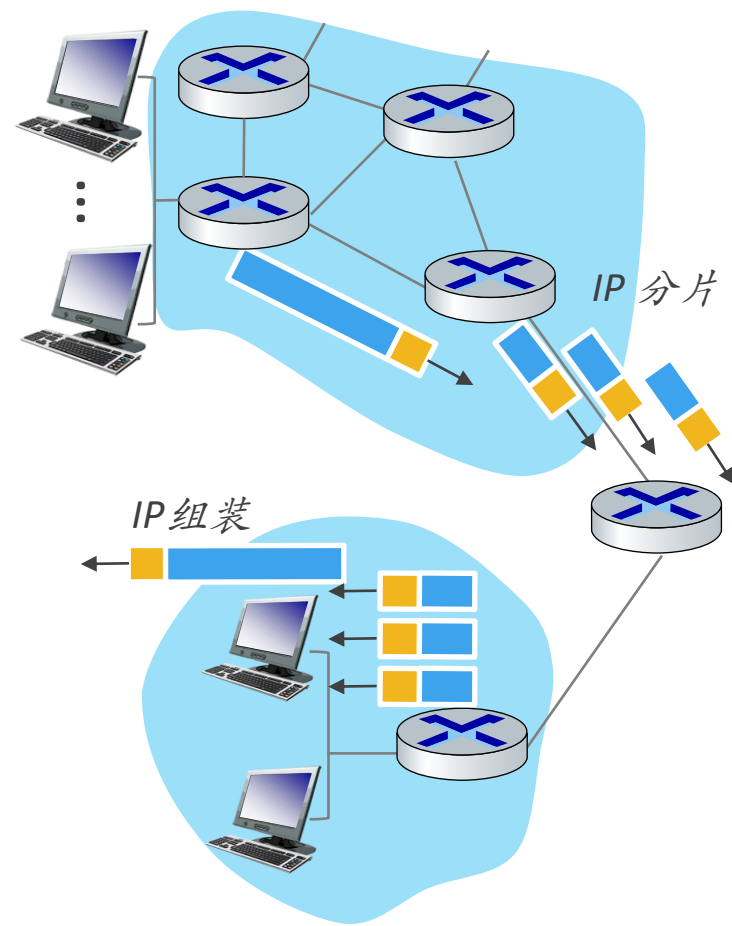
IP 数据报格式



- **服务类型**: 区分不同应用的数据报, 以提供不同类型的服务
- **IP数据报分片/组装**
- **Time-To-Live**: 分组寿命, 路由器处理完IP数据报后减一, 并丢弃TTL为0的数据报
- **上层协议**: 6表示TCP, 17表示UDP, 指导数据应该交给哪个协议

IP 数据报分片

- 网络链路有MTU，限制了IP数据报的长度
 - 不同的链路类型具有不同的MTU
- IP数据报长度 > 链路MTU，被分片
 - 在目的端IP层组装之后才向上交付
 - IP首部的一些比特位用于标识分片





IP 数据报分片

	数据报长度	16位标识	0 位	DF 位	MF 位	13位片偏移	
	首部+数据	由源主机添加，标识相同的分片	DF: 0 = May Fragment, 1 = Don't Fragment. MF: 0 = Last Fragment, 1 = More Fragments.			数据部分的偏移，8字节为单位	

IP 数据报分片

- 举例：数据报4000字节，MTU=1500字节

	数据报长度 = 4000	16位标识 = x	0	DF = 0	MF = 0	13位片偏移 = 0	
	首部+数据	由源主机添加，标识相同的分片	DF: 0 = May Fragment, 1 = Don't Fragment. MF: 0 = Last Fragment, 1 = More Fragments.			数据部分的偏移，8字节为单位	



IP数据报分片

■ 举例：数据报4000字节，MTU=1500字节

20字节首部 +
3980字节数据

	数据报长度 = 4000	16位标识 = x	0	DF = 0	MF = 0	13位片偏移 = 0	
--	-----------------	--------------	---	-----------	-----------	---------------	--

20字节首部 +
1480字节数据

	数据报长度 = 1500	16位标识 = x	0	DF = 0	MF = 1	13位片偏移 = 0	
--	------------------------	--------------	---	-----------	------------------	----------------------	--

20字节首部 +
1480字节数据

	数据报长度 = 1500	16位标识 = x	0	DF = 0	MF = 1	13位片偏移 = 1480/8 = 185	
--	------------------------	--------------	---	-----------	------------------	---------------------------------	--

20字节首部 +
1020字节数据

	数据报长度 = 1040	16位标识 = x	0	DF = 0	MF = 0	13位片偏移 = 370	
--	------------------------	--------------	---	-----------	------------------	------------------------	--



第四章知识点汇总

- 了解IP数据报格式
- 理解IP数据报分片的原因
- 掌握IP数据报分片的方法



习题

- 假设IPv4数据报长度为1500字节，用TCP发送一个5MB的文件需要（ ）个IP分组。假定所有协议不使用选项，只使用固定长度的头部。(1M=10⁶)
- A. 3334
- B. 3379
- C. 3425
- D. 3473

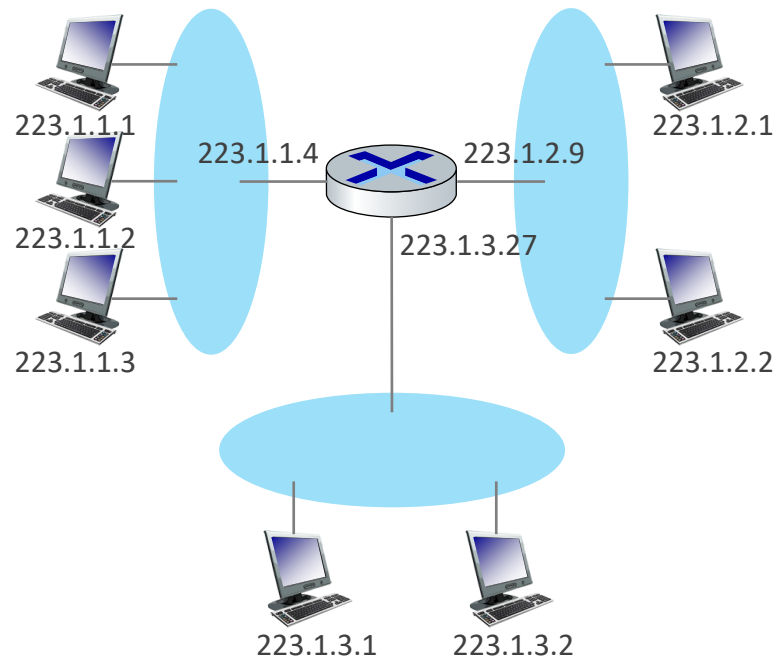


数据平面讲解内容

- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6

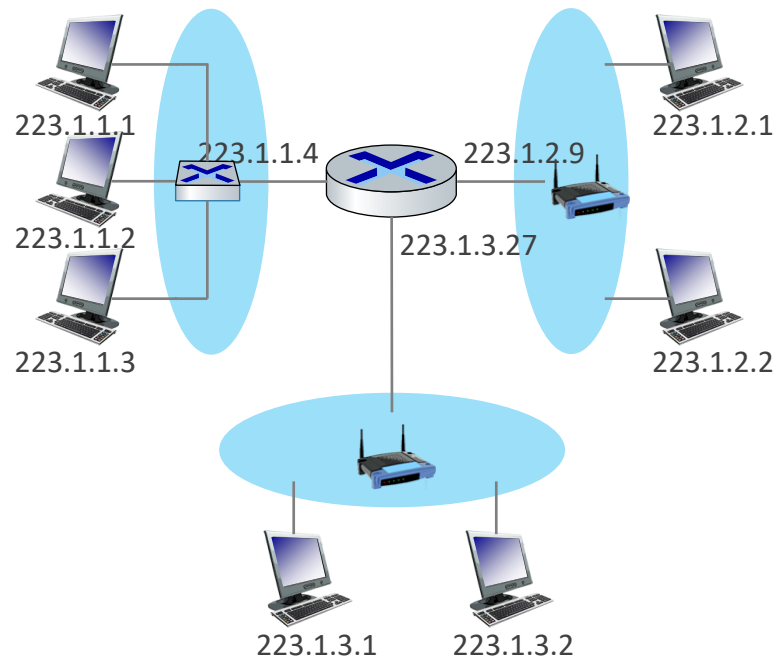
IP地址

- IP地址：主机/路由器接口的标识符
- 接口：
 - 路由器通常有多个接口
 - 主机通常有一个或多个接口（有线以太网、无线802.11）
- IP地址与接口对应



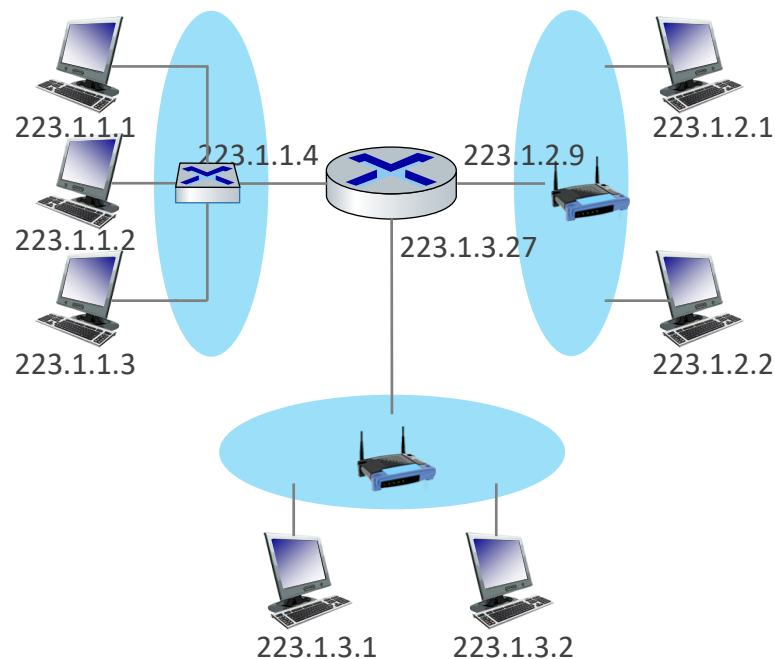
IP地址

- 接口之间如何连接?
 - 通过以太网交换机
 - 通过WiFi接入点
- 将在链路层章节介绍



IP地址

- 接口之间如何连接?
 - 通过以太网交换机
 - 通过WiFi接入点
- 物理上**不通过三层网络设备**连接的接口形成**子网**





IP地址

- IP地址
 - 32位，4字节
 - 点分十进制计法

11011111 00000001 00000001 00000001

223 . 1 . 1 . 1



IP地址

- IP地址
 - 32位，4字节
 - 点分十进制计法

11011111 00000001 00000001 00000001

223 . 1 . 1 . 1

子网部分 主机部分

- 两层结构
 - 子网部分：高位，标识子网，IP转发（将分组运送到目的子网）时使用
 - 主机部分：低位，标识子网内部的主机

两部分如何划分呢？



IP地址

- 怎么划分子网部分和主机部分呢？
- 分类编址
- 无类别编址：CIDR



IP地址：分类编址

- 网络部分定长
- 以前的编址方法 [RFC870, 1983]，已不用

	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7				
A类	0	网络部分							主机部分																											
B类	1	0	网络部分														主机部分																			
C类	1	1	0	网络部分																			主机部分													



IP地址：分类编址

- 网络部分定长
- 以前的编址方法 [RFC870, 1983]，已不用

	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7				
A类	0	网络部分							主机部分																											
B类	1	0	网络部分														主机部分																			
C类	1	1	0	网络部分																			主机部分													

- 存在的问题：地址浪费严重

类别	网络部分长度	主机数/网络 (主机部分取值的个数)	网络个数 (网络部分取值的个数)
A类	1字节	$2^{24} - 2 = 16777216 - 2$	$2^7 - 2 = 128 - 2$
B类	2字节	$2^{16} - 2 = 65536 - 2$	$2^{14} - 2 = 16384 - 2$
C类	3字节	$2^8 - 2 = 256 - 2$	$2^{21} - 2 = 2097152 - 2$



IP地址：分类编址

- 存在的问题：地址浪费严重
- 对于一个机构，C类（最多254个主机地址）太小，而B类（最多65534个主机地址）太大

类别	网络部分长度	主机数/网络 (主机部分取值的个数)	网络个数 (网络部分取值的个数)
A类	1字节	$2^{24} - 2 = 16777216 - 2$	$2^7 - 2 = 128 - 2$
B类	2字节	$2^{16} - 2 = 65536 - 2$	$2^{14} - 2 = 16384 - 2$
C类	3字节	$2^8 - 2 = 256 - 2$	$2^{21} - 2 = 2097152 - 2$



IP地址：CIDR

- 无类别域间路由选择（Classless Interdomain Routing CIDR）[1990s首次提出，RFC4632 (2006更新)]
- 地址格式 $a.b.c.d/x$ ，其中 x 是网络部分（前缀）的位数
- x 可以是任意 $[0, 32]$ 之间的值

网络部分(前缀) 主机部分

11001000 00010111 00010000 00000000

200.23.16.0/23

- 主机号全零：网络地址
- 主机号全幺：广播地址

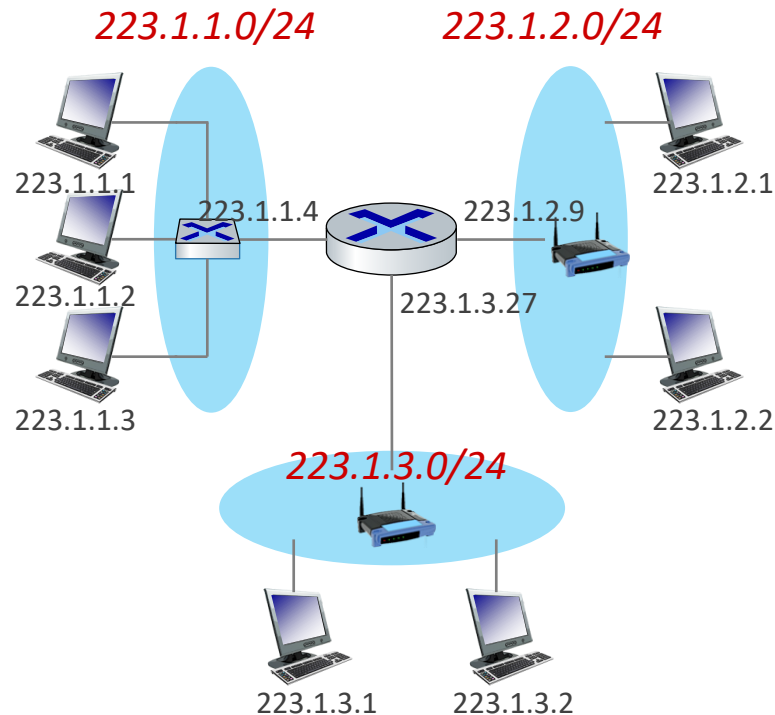


子网掩码 subnet mask

- 网络部分（前缀）全幺，主机部分全零
- 举例：
- 网络地址：200.23.16.0/23
- 对应子网掩码：255.255.254.0
- 以前的B类地址：172.16.0.0
- 对应子网掩码：255.255.0.0

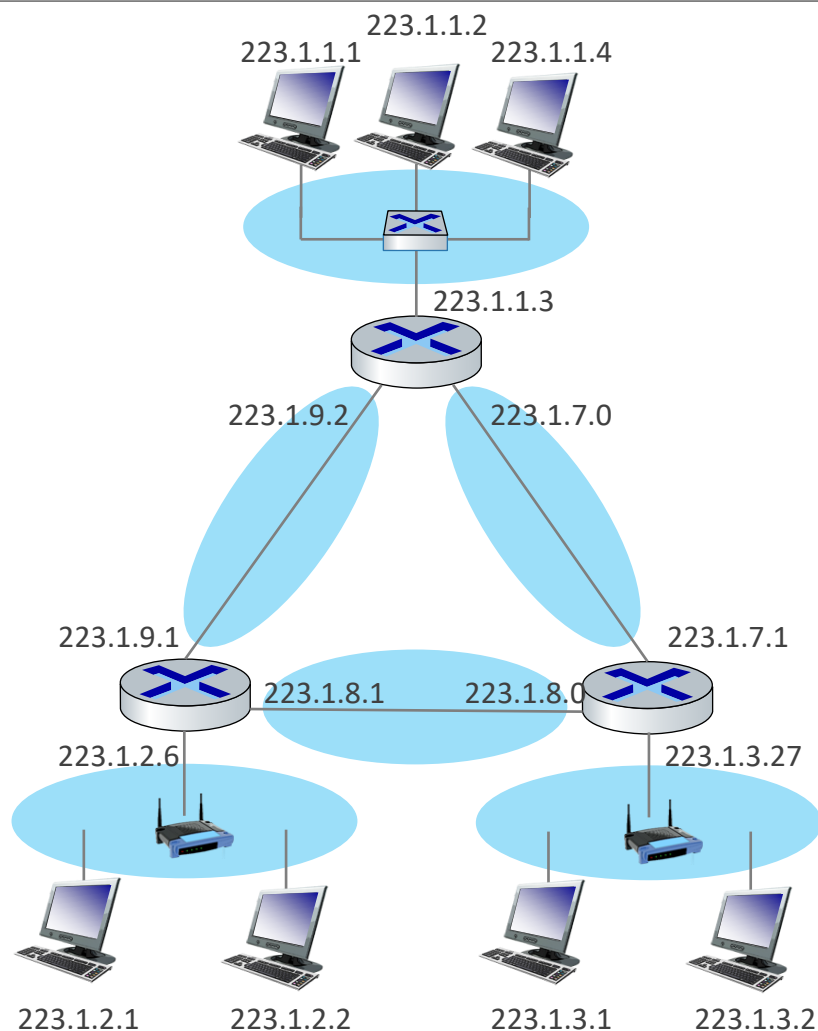
IP地址与子网

- 该网络中含有多少个子网？
- 物理上不通过三层设备连接的接口形成子网
- 每个子网合理的网络地址分别是什么？



子网

- 该网络中含有多少个子网？
- 物理上不通过三层设备连接的接口形成子网





第四章知识点汇总

- 了解IP地址和网络地址
- 了解子网
- 了解CIDR
- 了解以前的A/B/C分类编址方法，以及其缺点



数据平面讲解内容

- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6



转发

- 查询转发表，用目的IP地址匹配条目
 - 11001000 00010111 00010110 10100001 转发接口？
 - 11001000 00010111 00011000 10101010 转发接口？

目的地址范围	链路接口
11001000 00010111 00010000 00000000 到 11001000 00010111 00010111 11111111	0
11001000 00010111 00011000 00000000 到 11001000 00010111 00011000 11111111	1
11001000 00010111 00011001 00000000 到 11001000 00010111 00011111 11111111	2
其他	3



转发

- 查询转发表，用目的IP地址匹配条目
 - 11001000 00010111 00010110 10100001 转发接口：0
 - 11001000 00010111 00011000 10101010 转发接口：1

目的地址范围	链路接口
11001000 00010111 00010000 00000000 到 11001000 00010111 00010111 11111111	0
11001000 00010111 00011000 00000000 到 11001000 00010111 00011000 11111111	1
11001000 00010111 00011001 00000000 到 11001000 00010111 00011111 11111111	2
其他	3



转发

- 查询转发表，用目的IP地址匹配条目
 - 11001000 00010111 00010110 10100001 转发接口？
 - 11001000 00010111 00011000 10101010 转发接口？

网络地址	链路接口
11001000 00010111 00010000 00000000/21	0
11001000 00010111 00011000 00000000/24	1
11001000 00010111 00011000 00000000/21	2
其他	3



转发

- 查询转发表，用目的IP地址匹配条目
 - 11001000 00010111 00010110 10100001 转发接口：0
 - 11001000 00010111 00011000 10101010 转发接口：1
- 最长前缀匹配
 - 转发的时候，利用最长前缀匹配目的地址


网络地址	链路接口
11001000 00010111 00010000 00000000/21	0
11001000 00010111 00011000 00000000/24	1
11001000 00010111 00011000 00000000/21	2
其他	3



转发

■ 以上两个转发表等效

目的地址范围	链路接口
11001000 00010111 00010000 00000000 到 11001000 00010111 00010111 11111111	0
11001000 00010111 00011000 00000000 到 11001000 00010111 00011000 11111111	1
11001000 00010111 00011001 00000000 到 11001000 00010111 00011111 11111111	2
其他	3



网络地址	链路接口
11001000 00010111 00010000 00000000/21	0
11001000 00010111 00011000 00000000/24	1
11001000 00010111 00011000 00000000/21	2
其他	3



转发

- 查询转发表，用目的IP地址匹配条目
 - 200.23.22.161 转发接口？
 - 200.23.24.170 转发接口？

网络地址	链路接口
200.23.16.0/21	0
200.23.24.0/24	1
200.23.24.0/21	2
其他	3

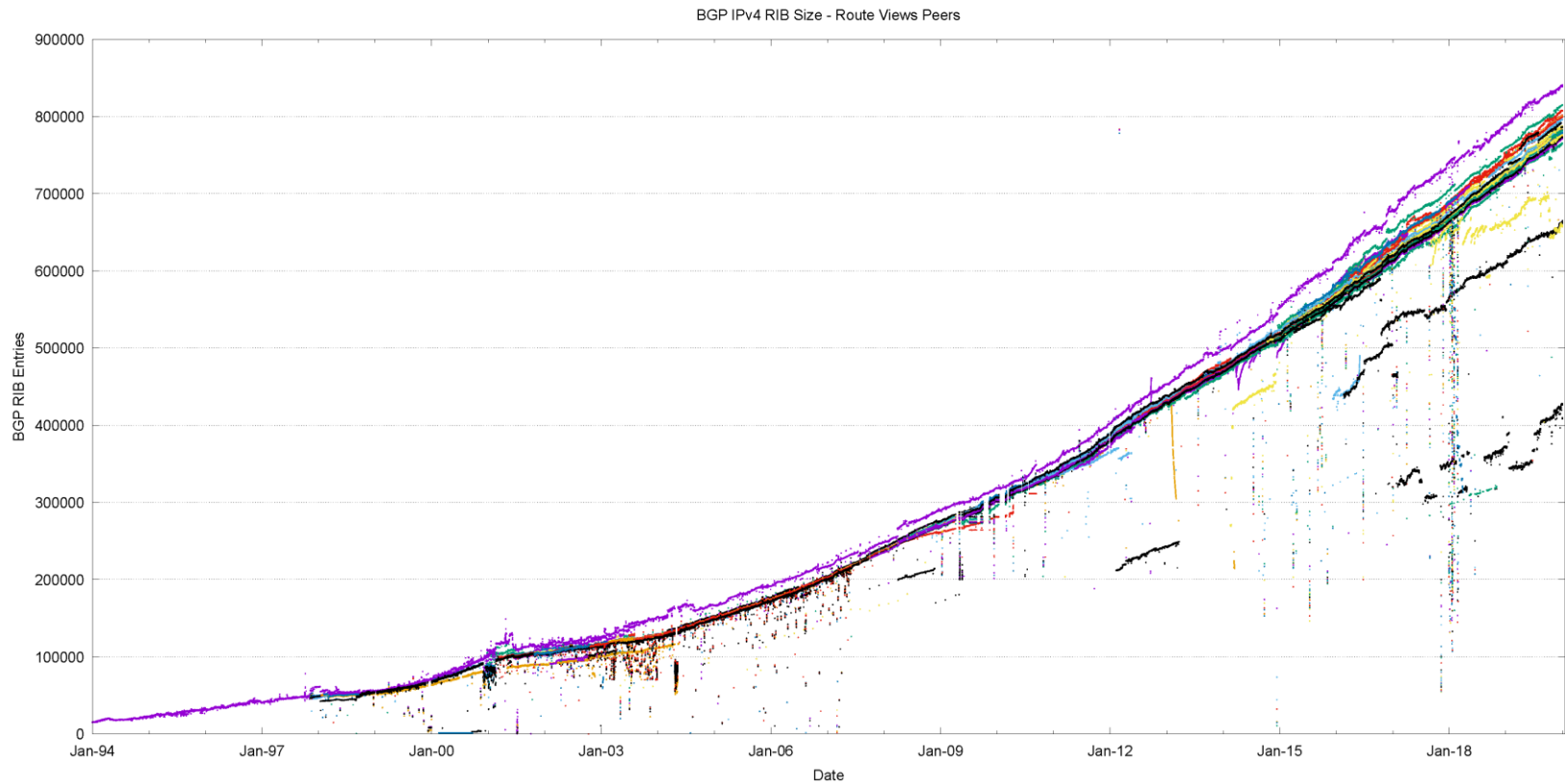


转发

- 路由器的链路速率100 Gbps
- 一个分组512位
- 大约每隔5ns，就有一个分组需要处理
- 查找1,000,000路由条目，在5ns内实现32位值的匹配，如何实现？
- 即使用一个最佳平衡二分搜索结构，也需要20次查找，每次查找要在0.25ns时间内完成。

IPv4路由表

路由表条目的规模接近 10^6 .



<https://www.potaroo.net/ispcol/2020-01/bgp2019.pdf>



第四章知识点汇总

- 理解转发的原理
- 理解最长前缀匹配的原理

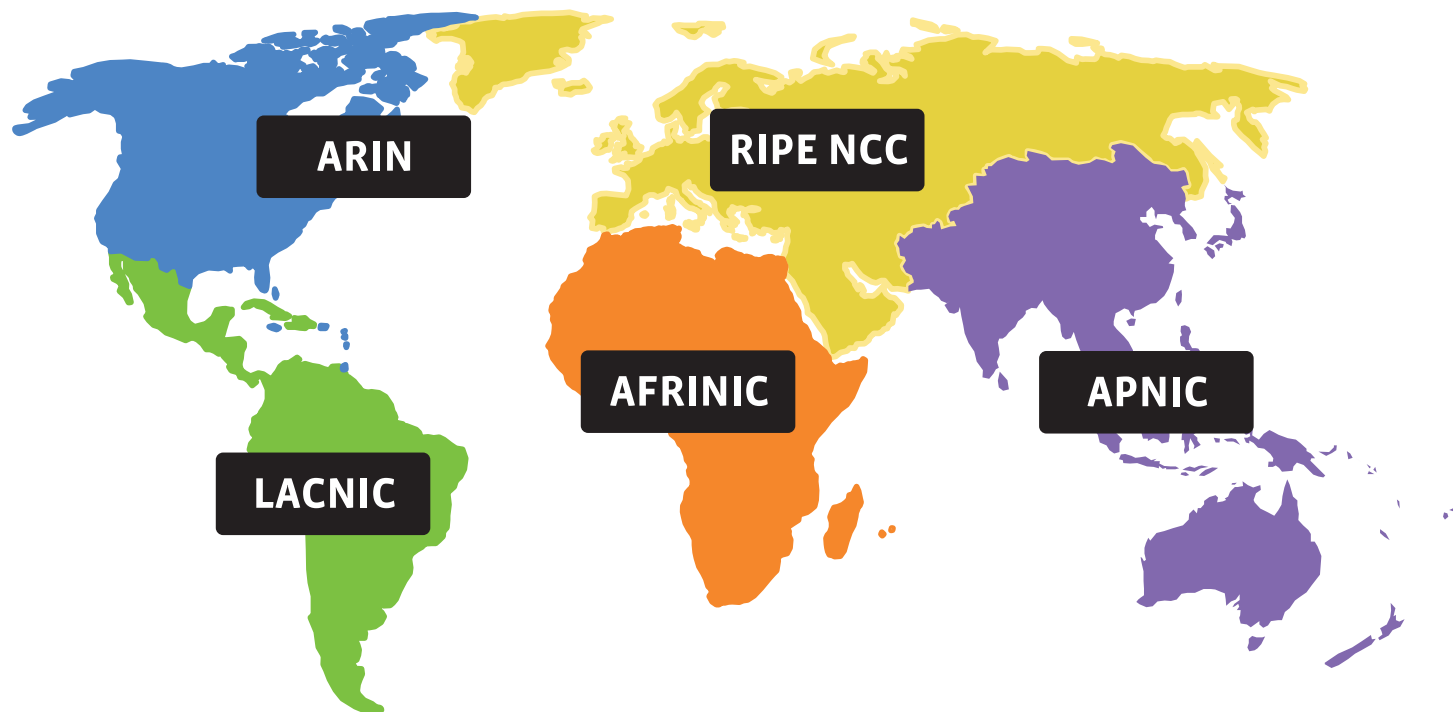


数据平面讲解内容

- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6

如何获取IP地址?

- IP地址分配由全球机构IANA ([Internet Assigned Numbers Authority](https://www.iana.org/)) 管理
- 下辖五个Regional Internet Registry



<https://www.iana.org/numbers>



如何获取IP地址?

- ISP向RIR（Regional Internet Registry）申请获得IP地址块
- 公司/学校/机构向ISP申请地址块
- 网络管理员负责为路由器接口分配IP地址



划分地址块

- ISP有一个地址块
- 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/20
- 有8个机构申请地址块，每个机构需要512个地址
- ISP该如何分配地址块呢？



划分地址块

- ISP有一个地址块

- 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/20

- 机构地址块：

- 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/23

- 11001000 00010111 00010001 11111111

- 11001000 00010111 00010010 00000000 200.23.18.0/23

- 11001000 00010111 00010011 11111111

- 11001000 00010111 00010100 00000000 200.23.20.0/23

-

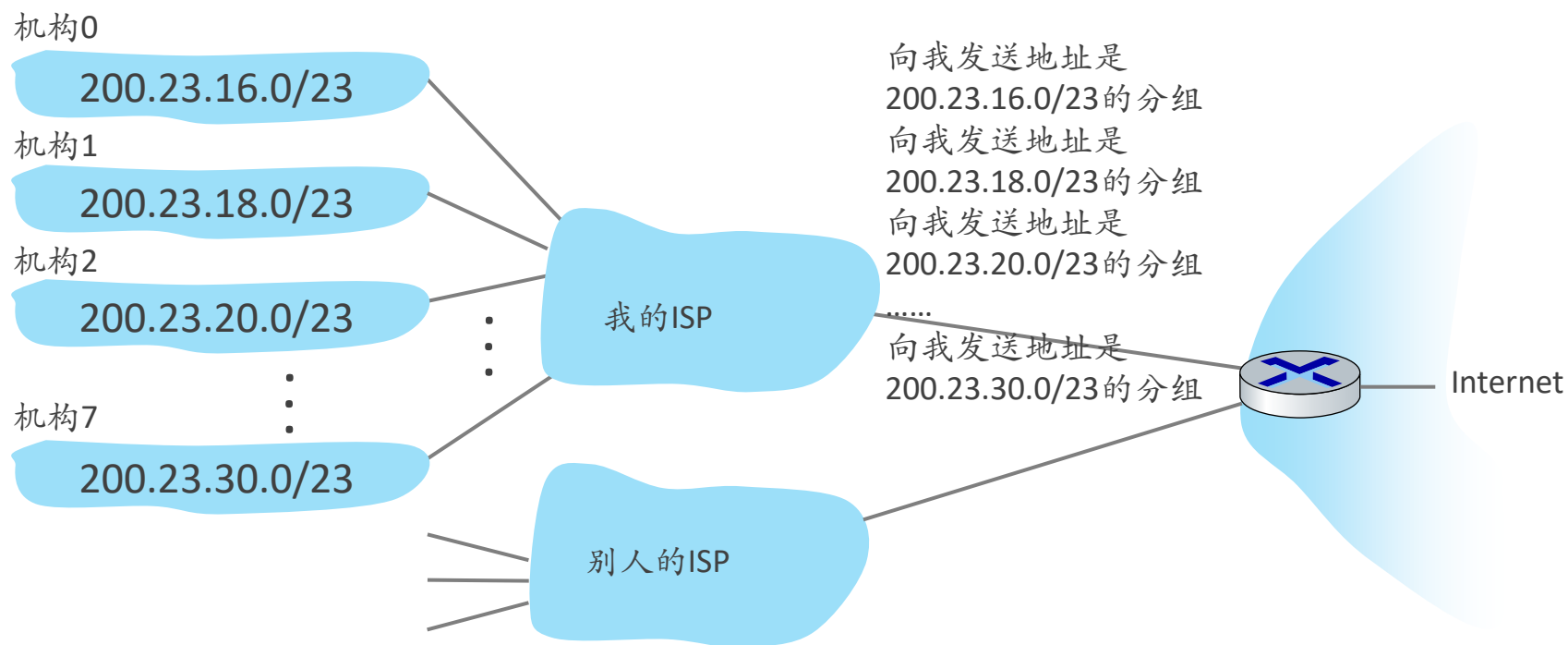
- 11001000 00010111 00011110 00000000 200.23.30.0/23



划分地址块

- ISP有一个地址块
- 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/20
- 机构地址块：
- 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/23
- 11001000 00010111 00010010 00000000 200.23.18.0/23
- 11001000 00010111 00010100 00000000 200.23.20.0/23
-
- 11001000 00010111 00011110 00000000 200.23.30.0/23

路由广播



路由广播

机构0

200.23.16.0/23

机构1

200.23.18.0/23

机构2

200.23.20.0/23

⋮

机构7

200.23.30.0/23

我的ISP

别人的ISP

网络地址	接口
200.23.16.0/23	0
200.23.18.0/23	0
200.23.20.0/23	0
200.23.22.0/23	0
200.23.24.0/23	0
200.23.26.0/23	0
200.23.28.0/23	0
200.23.30.0/23	0
其他	3



Internet

地址聚合

■ 聚合路由信息

- 缩小路由表
- 减少路由信息的广播代价

网络地址	接口
200.23.16.0/20	0
其他	3

机构0

200.23.16.0/23

机构1

200.23.18.0/23

机构2

200.23.20.0/23

⋮

机构7

200.23.30.0/23

我的ISP

向我发送地址是
200.23.16.0/20的分组

别人的ISP

Internet

地址聚合

■ 聚合路由信息

网络地址	接口
200.23.16.0/20	0
199.31.0.0/16	2
其他	3

机构0

200.23.16.0/23

机构1

200.23.18.0/23

机构2

200.23.20.0/23

⋮

机构7

200.23.30.0/23

我的ISP

向我发送地址是
200.23.16.0/20的分组

别人的ISP

向我发送地址是
199.31.0.0/16的分组



Internet

地址聚合

- 聚合路由信息
- 需要更改转发表吗?

网络地址	接口
200.23.16.0/20	0
199.31.0.0/16	2
其他	3

机构0

200.23.16.0/23

机构2

200.23.20.0/23

⋮

机构7

200.23.30.0/23

机构1

200.23.18.0/23

我的ISP

向我发送地址是
200.23.16.0/20的分组

别人的ISP

向我发送地址是
199.31.0.0/16的分组

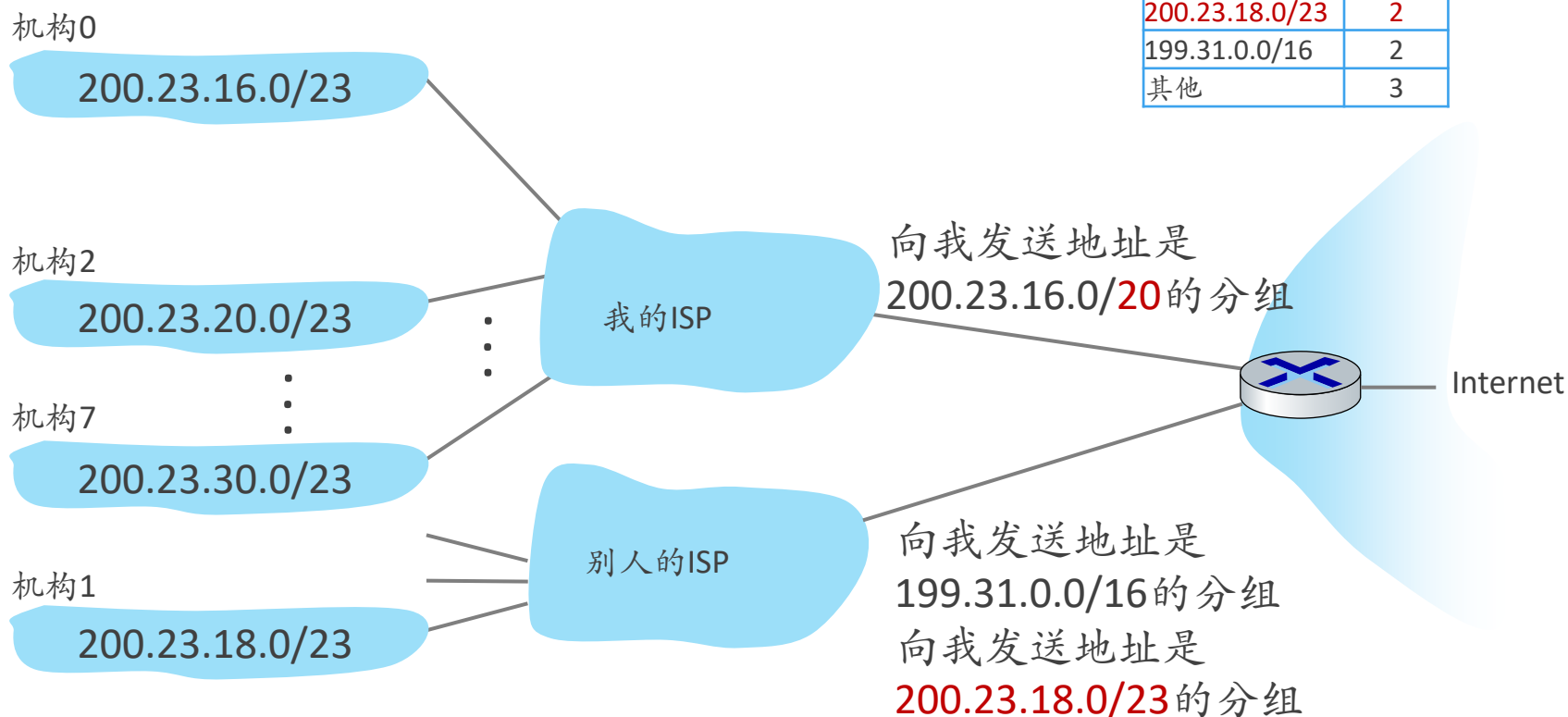


Internet

地址聚合

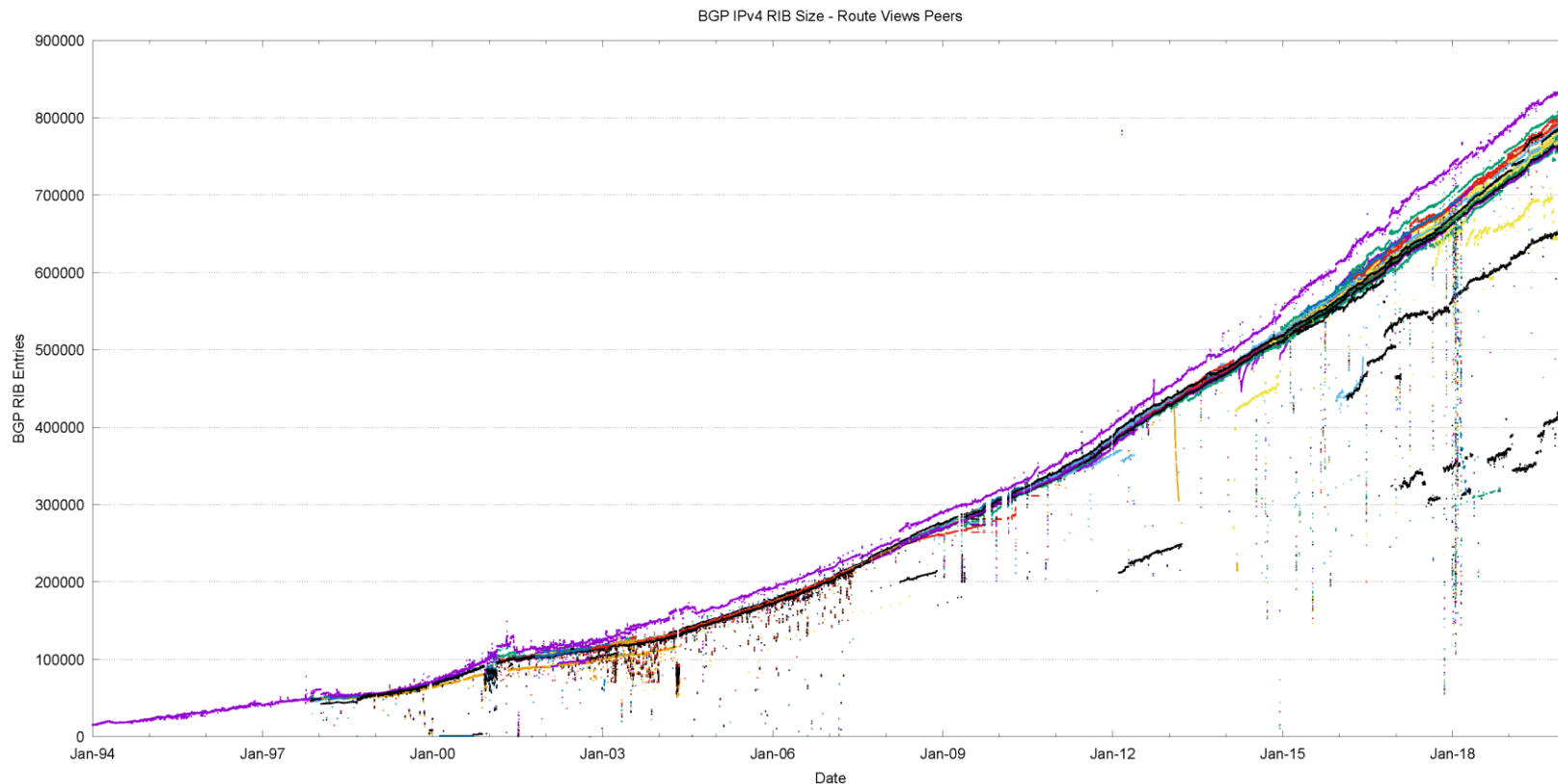
- 聚合路由信息
- 如何更改转发表?

网络地址	接口
200.23.16.0/20	0
200.23.18.0/23	2
199.31.0.0/16	2
其他	3



路由聚合

■ 真的减少了路由表规模吗？



<https://www.potaroo.net/ispcol/2020-01/bgp2019.pdf>



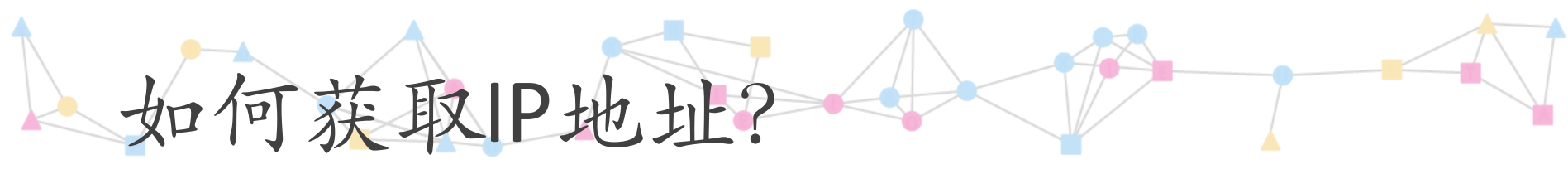
第四章知识点汇总

- 掌握划分地址块的方法
- 理解地址聚合



数据平面讲解内容

- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6



如何获取IP地址?

- 主机接口的IP地址可以手工配置
- 也可由DHCP(Dynamic Host Configuration Protocol)协议自动获取



DHCP协议

- 四个步骤：
 - 主机广播“DHCP Discover”报文
 - DHCP服务器以广播方式响应“DHCP Offer”报文
 - 主机广播“DHCP Request”报文
 - DHCP服务器以单播方式响应“DHCP ACK”报文

DHCP协议

DHCP服务器:
192.168.2.1

客户端

DHCP Discover

源: 0.0.0.0, 68
目的: 255.255.255.255, 67
Your IP address: 0.0.0.0
Transaction ID: 0x53fbefb5

广播: 有没有DHCP服务器

DHCP Offer

源: 192.168.2.1, 67
目的: 255.255.255.255, 68
Your IP address: 192.168.2.178
Transaction ID: 0x53fbefb5
租用时间: 1 day

广播: 我是DHCP服务器,
你可以用地址x.x.x.x

DHCP Request

源: 0.0.0.0, 68
目的: 255.255.255.255, 67
Your IP address: 0.0.0.0
Transaction ID: 0x53fbefb5
请求地址: 192.168.2.178
DHCP服务器: 192.168.2.1

广播: 好啊, 我用这个
IP地址

DHCP ACK

源: 192.168.2.1, 67
目的: 192.168.2.178, 68
Your IP address: 192.168.2.178
Transaction ID: 0x53fbefb5
租用时间: 1 day

单播: 好, 这个
地址给你用

DHCP协议

dhcpcapng

文件(F) 编辑(E) 视图(V) 跳转(G) 捕获(C) 分析(A) 统计(S) 电话(Y) 无线(W) 工具(T) 帮助(H)

应用显示过滤器 ... <Ctrl-/> + http-ieee

Time	Source	Source Port	Destination	Destination Port	Protocol	Info
0.000000	192.168.2.178	68	192.168.2.1	67	DHCP	DHCP Release - Transaction ID 0xfdb5b2be
51.627821	0.0.0.0	68	255.255.255.255	67	DHCP	DHCP Discover - Transaction ID 0x53fbefb5
54.924974	192.168.2.1	67	255.255.255.255	68	DHCP	DHCP Offer - Transaction ID 0x53fbefb5
54.926967	0.0.0.0	68	255.255.255.255	67	DHCP	DHCP Request - Transaction ID 0x53fbefb5
54.931202	192.168.2.1	67	192.168.2.178	68	DHCP	DHCP ACK - Transaction ID 0x53fbefb5

< >

> Frame 5: 354 bytes on wire (2832 bits), 354 bytes captured (2832 bits) on interface \Device\NPF_{...}

> Ethernet II, Src: ASUSTekC_..., Dst: ASUSTekC_...

> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.2.1, Dst: 192.168.2.178

> User Datagram Protocol, Src Port: 67, Dst Port: 68

> Dynamic Host Configuration Protocol (ACK)

< >

Dynamic Host Configuration Protocol (dhcp), 312 byte(s) | 分组: 5 · 已显示: 5 (100.0%) | 配置: Default

执行ipconfig /release 释放IP地址

执行ipconfig /renew
利用DHCP获取IP地址

传输层用UDP



DHCP协议

■ 除了获得IP地址，主机还通过DHCP服务器获得：

- 网络掩码
- 网络广播地址
- DNS服务器
- 默认网关

```
✓ Option: (1) Subnet Mask (255.255.255.0)
  Length: 4
  Subnet Mask: 255.255.255.0
✓ Option: (28) Broadcast Address (192.168.2.255)
  Length: 4
  Broadcast Address: 192.168.2.255
✓ Option: (6) Domain Name Server
  Length: 4
  Domain Name Server: 192.168.2.1
> Option: (81) Client Fully Qualified Domain Name
> Option: (252) Private/Proxy autodiscovery
✓ Option: (3) Router
  Length: 4
  Router: 192.168.2.1
```



第四章知识点汇总

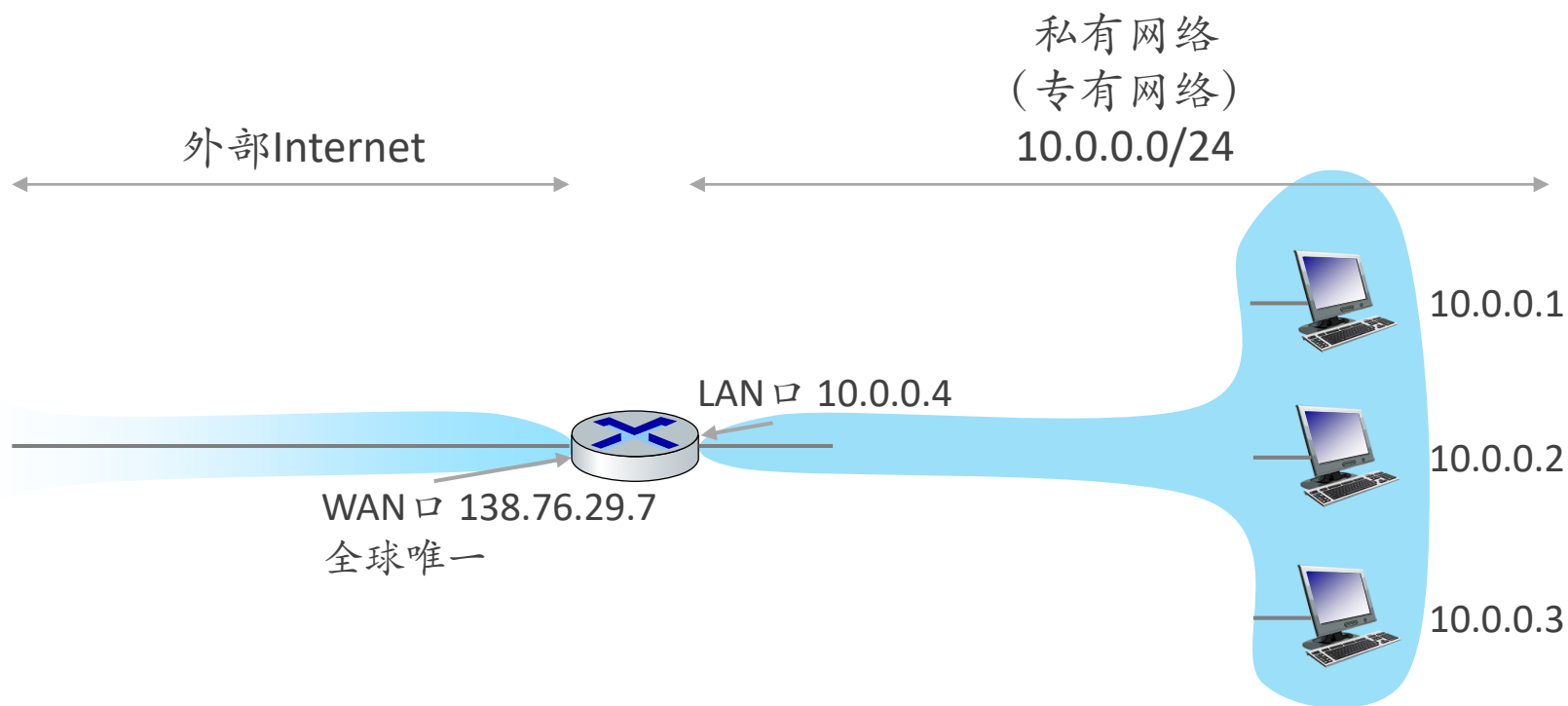
- 理解获取IP地址的方法
- 理解DHCP协议的原理



数据平面讲解内容

- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6

网络地址转换NAT



除了家庭网络，ISP也可能会用NAT



私有网络

- 为私有Internet预留的三块地址空间[RFC1918, 1996]:
- 10.0.0.0 — 10.255.255.255 (10.0.0.0/8)
- 172.16.0.0 — 172.31.255.255 (172.16.0.0/12)
- 192.168.0.0 — 192.168.255.255 (192.168.0.0/16)



网络地址转换NAT

■ Network Address Translation NAT路由器实现

NAT转换表	
WAN端地址	LAN端地址
138.76.29.7, 5001	10.0.0.1, 3345

1. 替换源地址：用端口号区分私有网络内部的设备

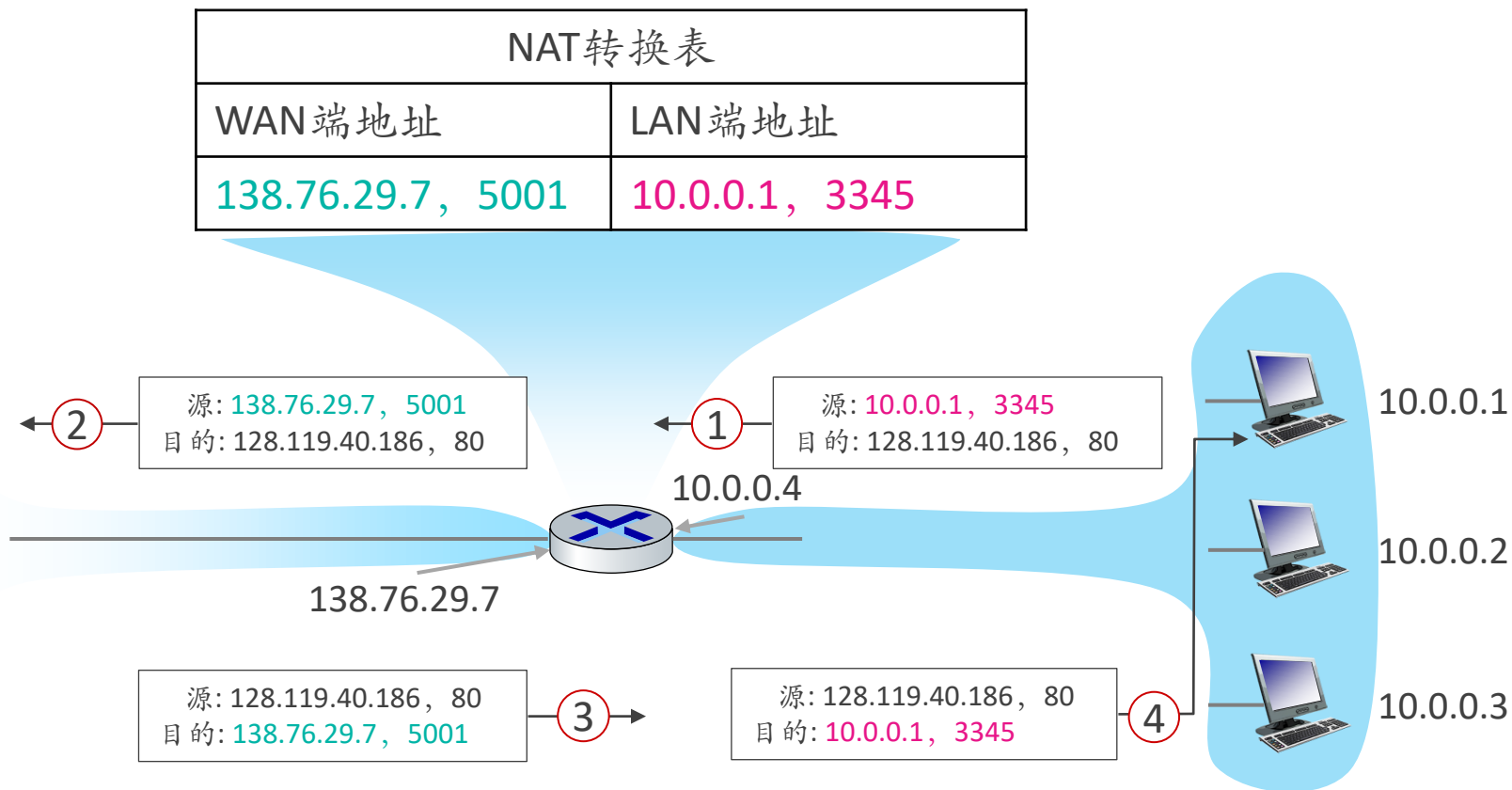
(LAN IP地址, 端口号) → (WAN IP地址, 新端口号)

2. 在NAT转换表中添加条目

3. 替换目的地址

(LAN IP地址, 端口号) ← (WAN IP地址, 新端口号)

网络地址转换NAT





网络地址转换NAT

- 好处：
- 本地网络只需向ISP申请一个IP地址
- 可以随意改变本地网络设备的地址
- 可以更换ISP，而无需改变本地网络设备的地址
- 本地网络内部的设备对外不可见，安全



网络地址转换NAT

- 争议：
- 路由器（网络层）修改端口号（传输层），违反了协议分层原则
- 地址短缺应该用IPv6来解决



第四章知识点汇总

- 理解NAT的原理
- 了解NAT的好处和存在的争议



数据平面讲解内容

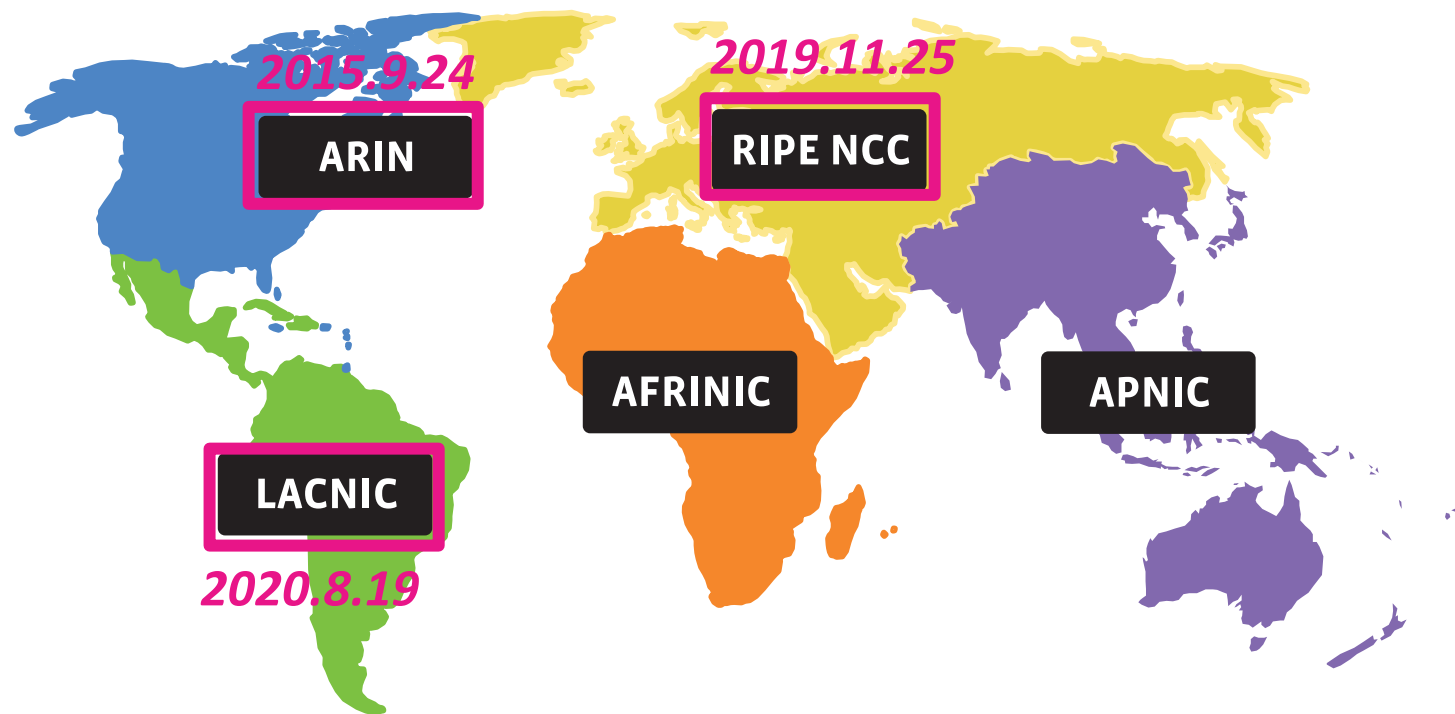
- 网络层概述与功能
- 路由器体系结构
- IP数据报格式与分片
- IP地址
- 转发
- 划分地址块与地址聚合
- DHCP协议
- 网络地址转换NAT
- IPv6



IPv6地址[RFC4291, 2006]

- 为了解决IPv4地址短缺的问题
- IPv6将地址长度由32位增加到了128位

IP地址耗尽



<https://www.iana.org/numbers>

<https://www.arin.net/resources/guide/ipv4/>

<https://www.ripe.net/publications/news/about-ripe-ncc-and-ripe/the-ripe-ncc-has-run-out-of-ipv4-addresses>

<https://www.apnic.net/manage-ip/ipv4-exhaustion/>

<https://afrinic.net/exhaustion>

<https://www.lacnic.net/1039/2/lacnic/phases-of-ipv4-exhaustion>

IPv4地址耗尽



RIPE NCC ✓
@ripenncc



Today, at 15:35, we made our final /22 IPv4 allocation from the last remaining addresses in our available pool. We have now run out of IPv4 addresses.

Read our full announcement here: ripe.net/publications/n...

In the picture, the Registration Services team at the RIPE NCC



♡ 3,624 10:50 PM - Nov 25, 2019

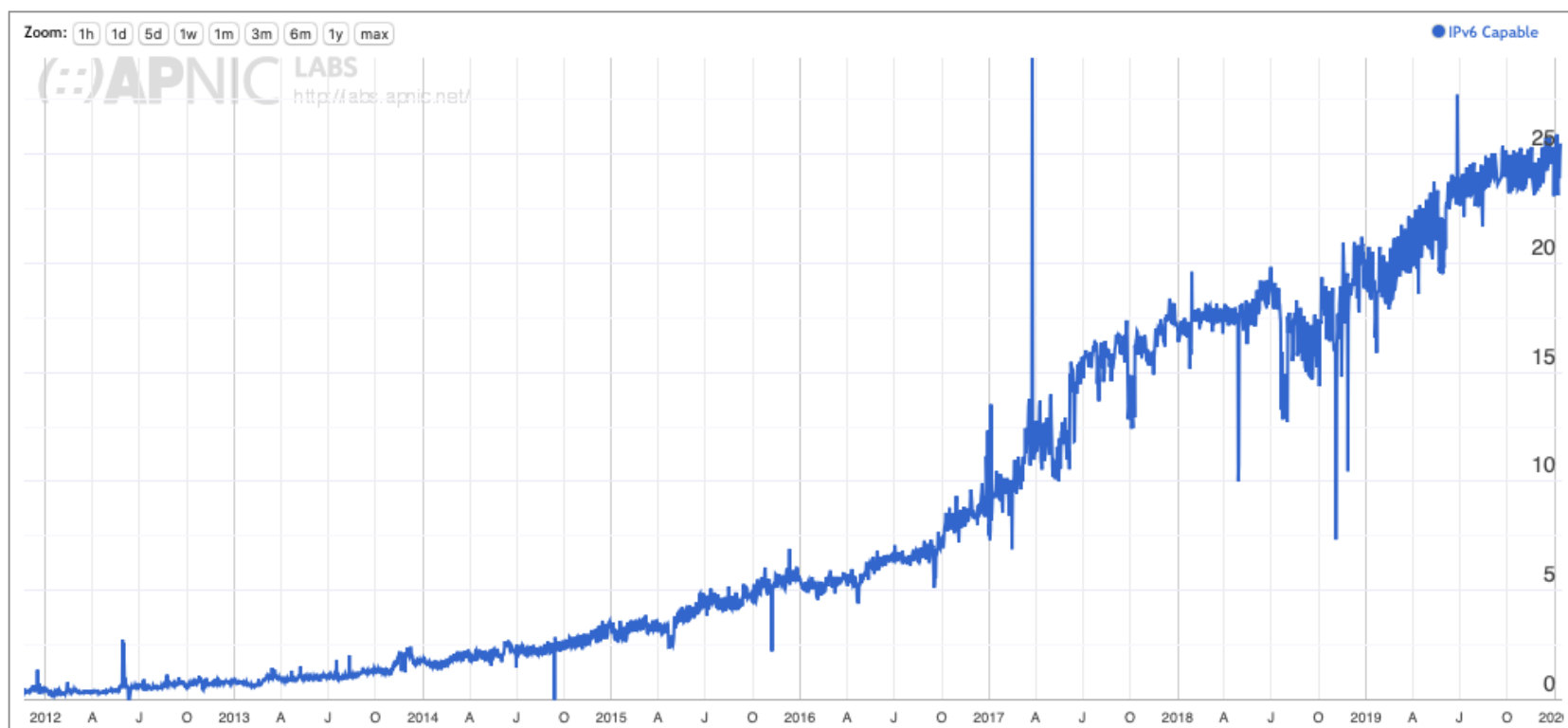


💬 3,444 people are talking about this



IPv6

- 纵轴单位%
- 截止2019年尾，只有25%的用户群支持IPv6.



<https://www.potaroo.net/ispcol/2020-01/bgp2019.pdf>



IPv6地址[RFC4291, 2006]

- IPv6地址表示方法
- 16位一段，分成8段，冒号分隔
- 0010000000000001:0000110110111000:0000000000000000:0000000000000000:
0000000000000001:0000000000000000:0000000000000000:0000000000000001
- 每段分别用16进制表示
- 2001:db8:0:0:1:0:0:1
- 对于连续的几段零，可以用双冒号代替，且双冒号只能用一次
- 2001:db8::1:0:0:1



IPv6地址[RFC4291, 2006]

- 可以有很多种别的写法:

- 2001:db8:0:0:1:0:0:1

- 2001:db8::1:0:0:1

- 2001:db8::0:1:0:0:1

- 2001:0db8::1:0:0:1

- 2001:db8:0:0:1::1

- 2001:db8:0000:0:1::1

- 2001:DB8:0:0:1::1

-



IPv6地址压缩规则[RFC5952, 2010]

- 一个16位段的起始零必须压缩
 - 错误示范：2001:0db8::1:0:0:1
- “::”的使用
 - 必须用于最大程度的压缩
 - 错误示范：2001:db8::0:1:0:0:1
 - 不能用于一个16位的全零段
 - 如果有多个可以替换的位置，选择可替换段数最多的；如果都一样，就选择第一个
 - 错误示范：2001:db8:0:0:1:1::1
- 必须使用小写字母
 - 错误示范：2001:DB8::1:0:0:1

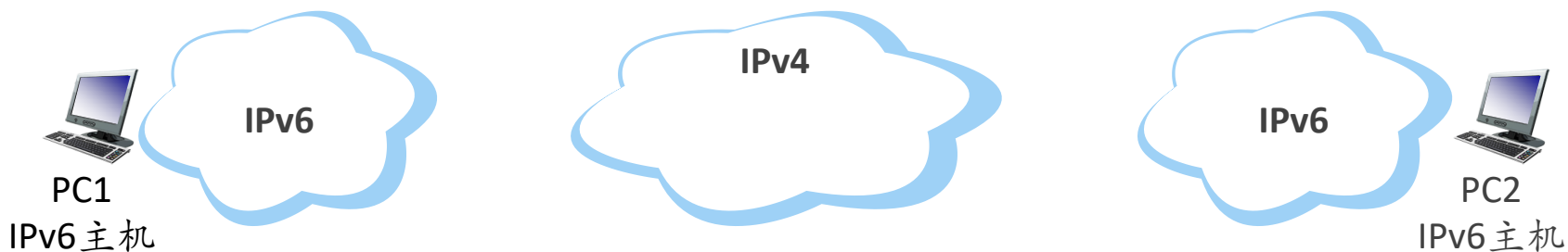
IPv6数据报格式



- 40字节首部
- 流量类型：与IPv4服务类型相似
- 下一个首部：类似于IPv4的上层协议
- 跳限制：类似于IPv4的TTL
- 取消了IP分片
- 取消了首部校验和

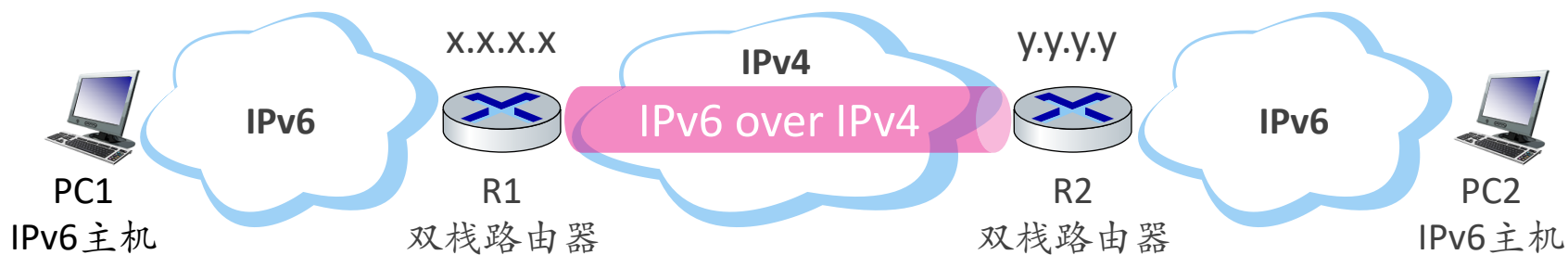
IPv6 over IPv4

- IPv6逐步过渡中，两个IPv6网络之间只有IPv4网络，两个IPv6网络能否利用已有的IPv4网络实现互联呢？



IPv6 over IPv4

- 隧道技术
- 将IPv6数据报封装成IPv4数据报传输



IPv6 over IPv4

- 隧道技术
- 将IPv6数据报封装成IPv4数据报传输





第四章知识点汇总

- 了解IPv6地址的表示方法
- 了解IPv6数据报格式
- 理解IPv6 over IPv4隧道技术的原理

*Asks the Possible to the Impossible,
“Where is your dwelling-place?”
“In the dreams of the impotent,” comes the answer.*

可能问不可能道：
“你住在什么地方呢？”
它回答道：“在那无能为力者的梦境里。”

——*Tagore*