

软件实验第一阶段 Router-Lab

路由器实验团队
2023年3月



计算机网络
教案社区



主要内容

1. 实验目标
2. 实验内容
3. 实验平台
4. 实验文档
5. 编程实验部分简介





实验目标



- 本实验最终目标是在以下三个选项中，选择完成一个
 - RIPng 路由器
 - 实现 RIPng 路由协议，宣告和更新路由表
 - 根据动态路由表，实现 IPv6 分组转发
 - DHCPv6 服务器
 - 实现 IPv6 ND 和 DHCPv6 协议，为客户端分配动态 IPv6 地址
 - 根据静态路由表，实现 IPv6 分组转发（框架提供）
 - TFTP 客户端和服务端
 - 客户端：实现 TFTP 协议，上传和下载文件
 - 服务端：实现 TFTP 协议，处理多个客户端的上传和下载请求



实验目标（续）



➤ 此外，希望实验者锻炼如下能力

- 网络系统调试方法
- 阅读、理解并实现 RFC 文档的能力
- Linux 等操作系统的网络配置

➤ 学术道德

- 参考网上代码请注明出处
- 横向（同学代码）+纵向（往届代码）查重
- 实验中的所有Commit都会作为查重依据
- **严禁抄袭！抄袭被认定后实验计零分！**



实验内容



➤ 第一部分：编程作业 (20%分数)

- 四个编程实验，对应软件路由器的若干核心功能
- 通过 Git 提交到 `git.tsinghua.edu.cn`，CI 自动进行评测
- 在实验平台 ([TANLabs](#)) 上查看 CI 测试结果
- 规定的输入输出和测试样本：OJ做题

➤ 第二部分：真机评测 (个人+团队各40%分数)

- 基于第一部分的编程作业实现完整的软件
- 通过 Git 提交并在实验平台上评测
- 在云端**真实硬件**上运行和测试
- 个人：与成熟的标准实现进行测试
- 互联：与其他八名同学的实现进行测试



实验安排时间线



清华大学
Tsinghua University

计算机网络教案社区

实验前请
更新代码
仓库!

一阶段
校历3-9周

4个功能函数

二阶段
校历10-12周

个人
验收

三阶段
13-14周

团队
验收

截止
时间

4月23日
22:00:00

5月14日
22:00:00

5月28日
22:00:00

迟交扣分规则:

补交得分 $S' = S \times \min(0.8, 0.95^D)$

其中, S 是作业原始得分, D 是向上取整的迟交天数



实验平台



- 清华高级网络实验平台 (TANLabs)
 - <https://lab.cs.tsinghua.edu.cn/tan>
- 第一步：在 TANLabs 上登录并创建实验者仓库
 - 名称：network-2023spring/router-lab-xxx
 - 登录Tanlabs后签署honor code，自动生成基础仓库
- 第二步：Git 提交，并查看结果
 - 每次 Git Push 会自动评测，实验者在 TANLabs 查看评测结果
 - master 分支不允许 Force Push
 - **所有Commit都会作为查重依据，严禁抄袭**



实验平台



- 第三步：提交评测任务，在树莓派上评测
 - TANLabs 自动分配树莓派并按照[实验文档](#)描述的流程进行评测
 - 在线查看评测结果和过程中产生的日志
- 第四步：标记最终的评测结果
 - 选择一次评测结果作为最终结果，记录成绩
 - 必须选择 master 分支的提交对应的评测结果
 - 截止时间前可以重复修改
- 截止时间后补交，将按迟交时间扣分
 - 补交得分 $S' = S \times \min(0.8, 0.95^D)$
 - S 是作业原始得分， D 是向上取整的迟交天数



实验文档



计算机网络教案社区

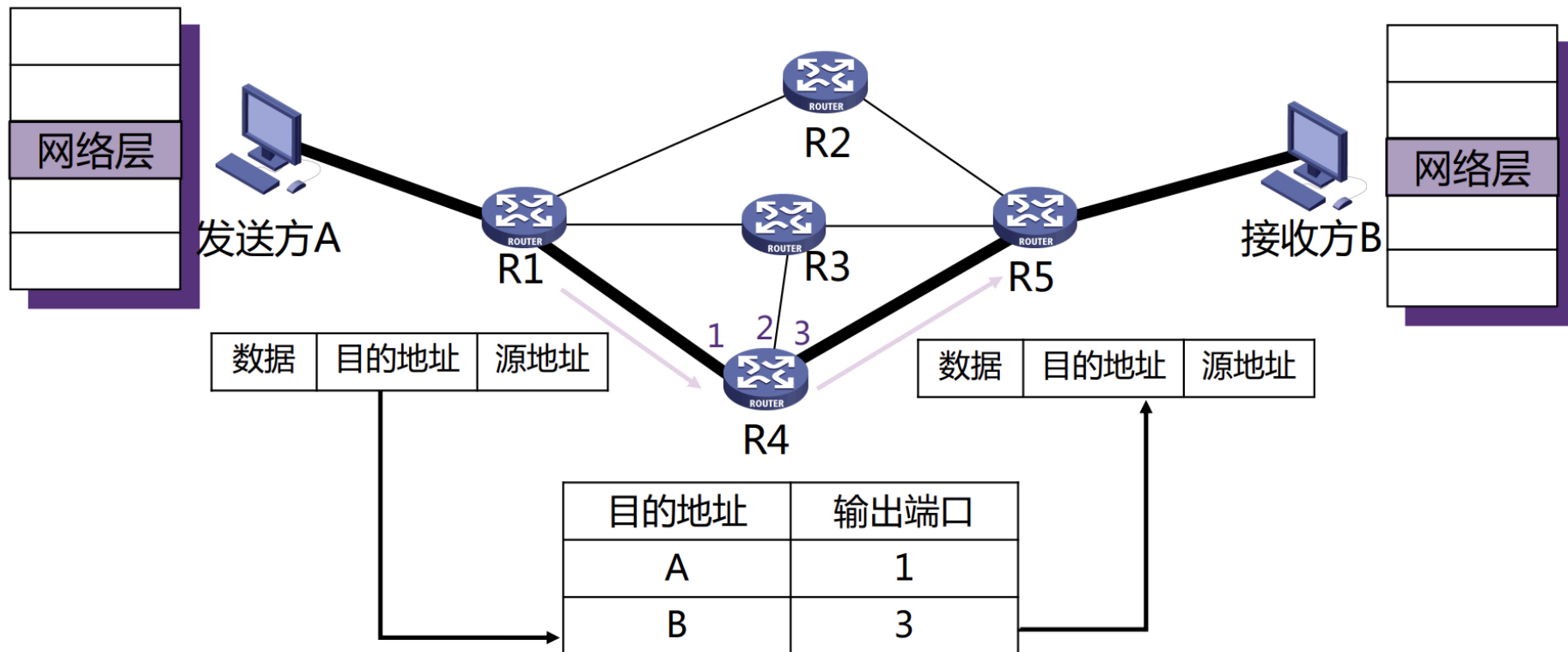
- 实验文档涵盖了实验的所有信息
 - <https://lab.cs.tsinghua.edu.cn/router/doc>
 - 请参考**软件实验**部分，本学期未开设硬件路由器实验
 - 在线评测的各个环节
 - 如何搭建本地的评测环境
 - Linux 网络的配置方法
 - 常见的错误
 - 路由器的调试方法
- 如有更新，以实验文档的为准
 - 会通过网络学堂等方式通知





数据报的转发策略

- 数据报转发策略：数据报转发决策基于分组的目的地址





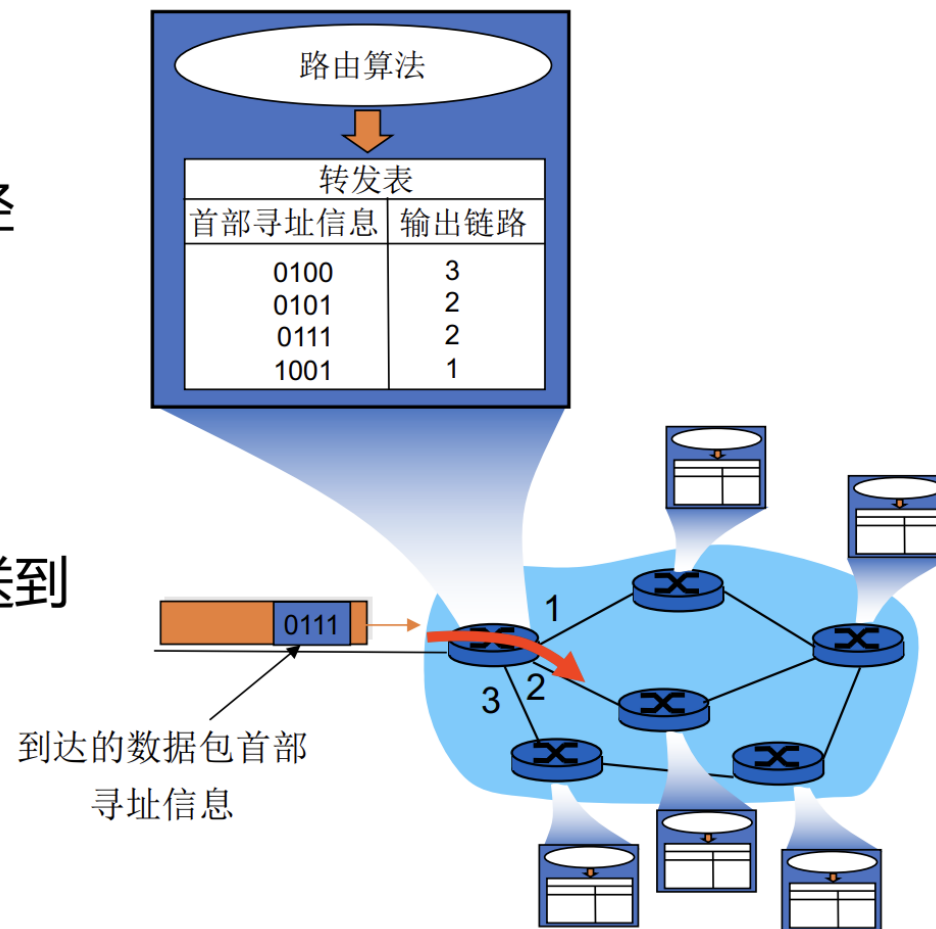
网络层关键功能

➤ 路由（控制面）

- 选择数据报从源端到目的端的路径
- 核心：**路由算法与协议**

➤ 转发（数据面）

- 将数据报从路由器的输入接口传送到正确的输出接口





编程作业部分简介



➤ 路由器的两个功能

- 路由（控制面）：分组要去哪？
 - 核心：路由算法和路由协议（BGP, OSPF, **RIP**）
 - 路由协议：路由器之间相互学习策略，形成对网络的认识
- 转发（数据面）：分组怎么转发？
 - 通过控制面形成的知识，指导分组的转发接口
 - 防止循环转发浪费网络资源（路由错误、设备故障...），通过跳数限制解决：生存时间TTL
 - IP报头错误导致无效传输，通过头部校验解决：首部校验和



编程作业部分简介

➤ 路由器的两个功能

- 控制平面：BGP、OSPF、RIP，交互&维护路由表
- 数据平面：MAC更新，IP头更新（TTL，checksum）

➤ 提取出四个核心功能函数，OJ测试

- eui-64：生成 IPv6 Link Local 地址 <-> 直连路由处理
- internet-checksum：计算校验和 <-> 包转发功能
- lookup：路由表查询和更新 <-> 维护路由表
- protocol：RIPng 协议解析和封装 <-> 路由器间交互

➤ 真机实验实现主循环，复用这部分代码



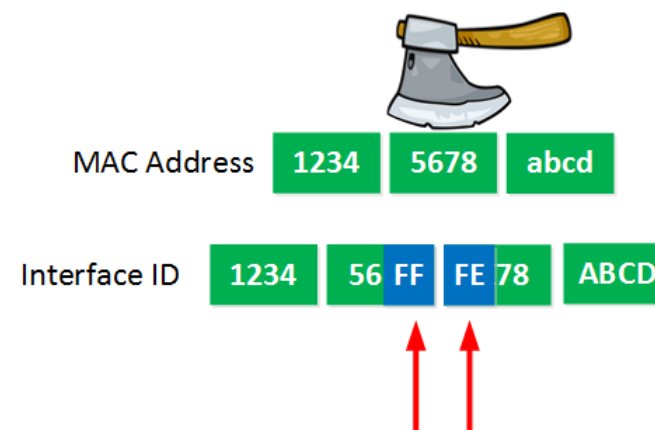
编程作业1：eui-64

➤ IPv6地址分类

- 未指定地址 (::/128) , 不能分配给任何节点
- 回环地址 (::1/128) , 表示节点自己, 不分配, 类似IPv4中的127.0.0.1
- 组播地址 (FF00::/8)
- **链路本地地址 (FE80::/10)** , 也称为link-local地址, 仅在本地球链路上使用, 网络设备根据接口MAC地址自动生成
- 全局单播地址, 其它地址

➤ MAC -> IPv6

- 仔细阅读作业文档 + RFC
- 按部就班生成IPv6 link-local address

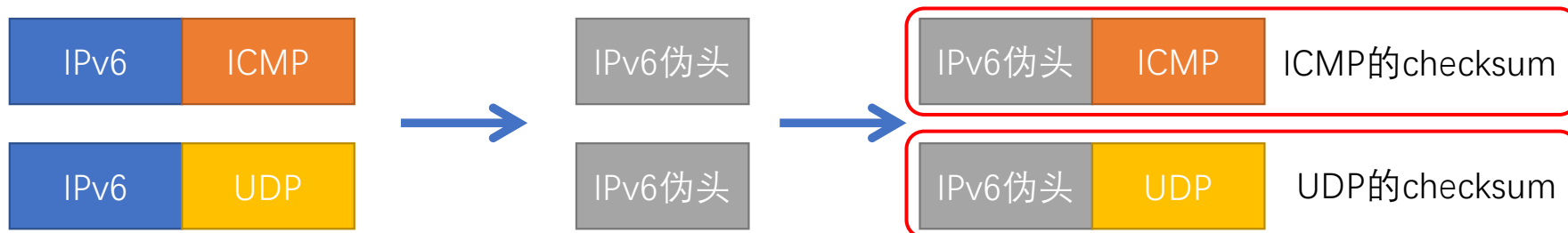




编程作业2: internet-checksum

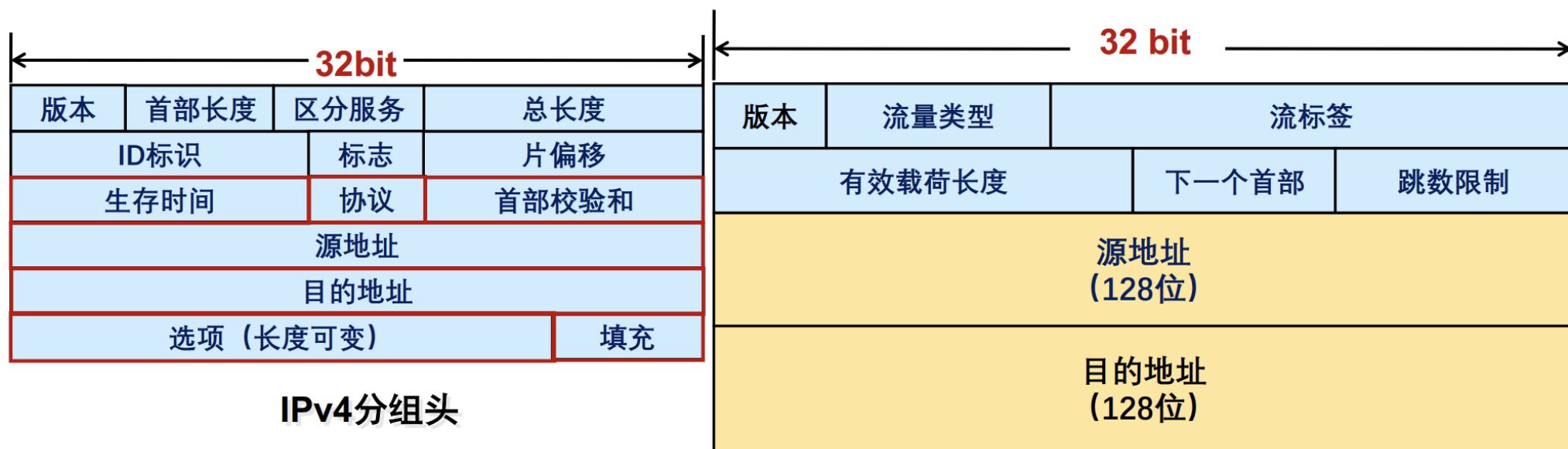
➤ 首部校验和

- IP报头错误导致无效传输, 通过头部校验解决
- IPv4用数据包头中的checksum字段验证IP头正确性
- IPv6用IP上层协议的checksum验证正确性
 - 构造IPv6 Pseudo Header, 与上层协议内容一起checksum
 - 实验实现: ICMPv6下的checksum, UDP下的checksum



IPv6头部

- 版本：4bit，协议版本号，值为6
- 流量类型：8bit，区分数据包的服务类别或优先级
- 流标签：20bit，标识同一个数据流
- 有效载荷长度：16bit，IPv6报头之后载荷的字节数（含扩展头），最大值64K





编程作业3: lookup

➤ 路由表增删改查

- 用数据结构存储路由表，实现insert(delete), query功能。
- query返回匹配结果，按照最长前缀匹配。 对应分组查询出接口
- insert插入新表项 || 更新旧表项。 对应路由器间交换路由知识
- delete删除表项。 对应路由器间交换路由知识

➤ 四个概念

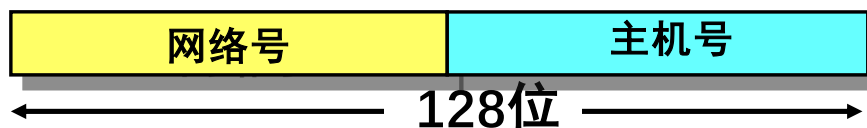
- IPv6地址简写
- CIDR和子网划分
- 最长前缀匹配
- 地址和地址掩码

```
typedef struct {  
    in6_addr addr;            // 匹配的 IPv6 地址前缀  
    uint32_t len;            // 前缀长度  
    uint32_t if_index;      // 出端口编号  
    in6_addr nexthop;       // 下一跳的 IPv6 地址  
    // 为了实现 RIPng 协议, 在 router 作业中需要在这里添加额外的字段  
} RoutingTableEntry;
```



编程作业3：lookup

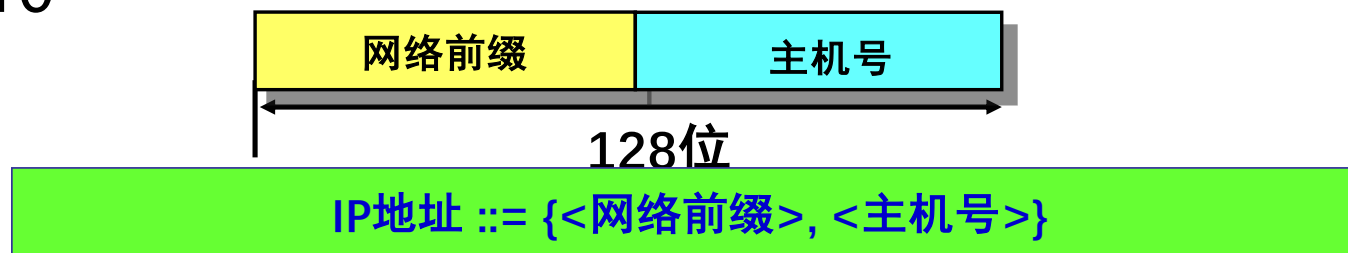
- IPv6地址表示法，冒分十六进制， $x:x:x:x:x:x:x:x$
 - 简化方法：每个x前面的0可省略，可把连续的值为0的x表示为“::”，且“::”只能出现1次
 - 简化前地址，2001:0DA8:0000:0000:200C:0000:0000:00A5
 - 简化后地址，2001:DA8:0000:0000:200C::A5
- IPv6 地址
 - 我们将 IPv6 地址划分为：网络地址 和 网络中的主机地址





编程作业3: lookup

- CIDR (Classless Inter-Domain Routing)
 - 将 128 位的 IPv6 地址划分为前后两个部分, 并采用斜线记法, 即在IPv6地址后加上 “/”, 然后再写上**网络前缀所占位数**, 如 fd00::/10

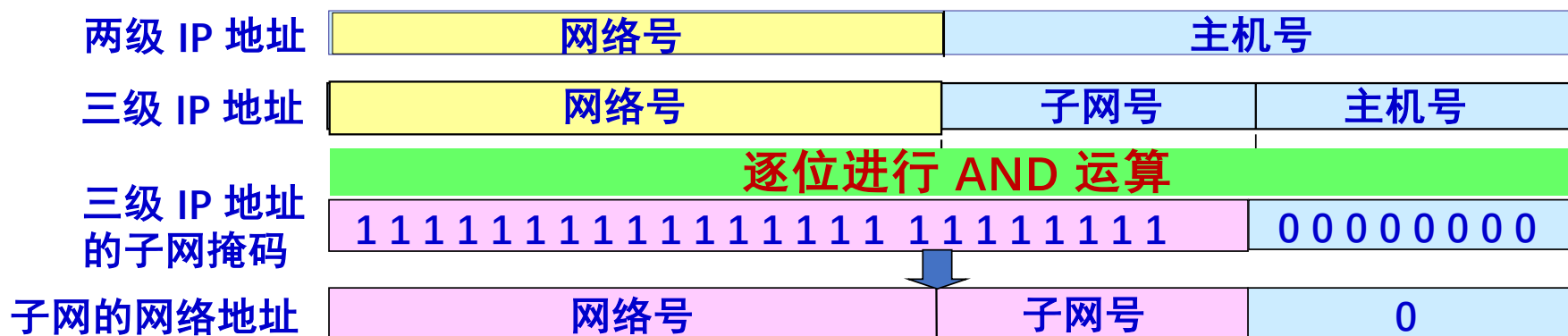


- 一个 CIDR 地址块可以表示很多地址, 这种地址的聚合常称为**路由聚合 (route aggregation)**, 也称为构成**超网 (supernet)**



子网划分

- 如何减少 IP 地址的浪费，使得网络的组织更加灵活、便于维护和管理？
- **子网划分(subnetting)**，在网络内部将一个网络块进行划分以，供多个内部网络使用，对外仍是一个网络
- **子网(subnet)**，一个网络进行子网划分后得到的一系列结果网络称为子网
- **子网掩码(subnet mask)**，与 IP 地址一一对应，是32 bit 的二进制数，置1表示网络位，置0表示主机位





编程作业3：lookup



Tsinghua University

计算机网络教案社区

➤ 最长前缀匹配

- 网络中利用不同的前缀长度聚合子网路由
- 以 IPv4 路由表项为例：192.168.0.0/24 -> if1
- 该路由表项表示目的地址形如 192.168.0.* (前缀长度为24位) 的数据包由网口 if1 转发
- 相当于一个大小为 $2^{(32 - 24)} = 256$ 的子网所有地址被一条路由表示



最长前缀匹配

最长前缀匹配 (Longest prefix match)

- CIDR可变长子网掩码以及路由聚合，需要最长前缀匹配来实现最精确匹配
- IP地址与IP前缀匹配时，总是选取子网掩码最长的匹配项
- 主要用于路由器转发表项的匹配，也应用于ACL规则匹配等

IP前缀 (2种描述方式)		出接口号
200.23.16.0/21	11001000 00010111 00010	0
200.23.24.0/23	11001000 00010111 0001100	1
200.23.24.0/21	11001000 00010111 00011	2
Otherwise 0.0.0.0/0	--	3

IP地址 : 200.23.22.161 (11001000 00010111 00010110 10100001) , 接口0

IP地址 : 200.23.24.170 (11001000 00010111 00011000 10101010) , 接口1

编程作业3: lookup

➤ 地址和地址掩码

- 地址掩码：前缀长度的另外一种表达方式，有助于实现路由表维护
- 从二进制的视角看，是首先一系列的 1，然后一系列的 0
- 掩码中 1 的个数就是前缀长度

前缀长度	掩码
0	::
1	8000::
16	ffff::
120	ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ff00

• 前缀匹配的实现？

- 表项地址 & 掩码 == 分组目标地址 & 掩码



编程作业4: protocol

➤ RIPng 协议解析和封装

- 定义在RFC 2080的, 针对 IPv6 场景下的 RIP 协议
- 解析: 其他路由器发给自己的消息, 提取路由知识更新路由表
- 封装: 自己发给其他路由器的消息, 根据路由表传递路由知识
- 核心:
 - RIPng的报文格式
 - RIPng entry <-> routing table entry
- 仔细阅读作业文档 + RFC, 按部就班解析&封装报文



编程作业部分简介



- 编程作业为 Homework 目录下的四个题目
 - eui64、internet-checksum、lookup、protocol
 - 题目目录下给出测试数据，评分脚本和题目要求README
 - 本部分实现代码将在真机阶段中复用
- 三部分资料，仔细阅读
 - 目录下的 README.md。 描述相关算法，给出RFC
 - 代码中的注释。 输入输出定义，框架代码解释
 - 阅读相关RFC。 原始资料，更细节的描述



编程作业部分简介



- 一些小建议
 - **三部分资料，仔细阅读**
 - 复用实验框架中定义的数据包头结构
 - 善用 VS Code go to definition 功能
 - 建议使用 `struct *`，而不是 `uint32_t []` 与偏移
 - 部分测试输入输出为PCAP格式，使用 Wireshark 打开pcap文件观察，有助于调试
- 编程作业部分，只验证功能的正确性，不对性能做要求
- 注意在DDL之前，在TANlabs网站上标记最终版本



重点回顾



Tsinghua University

计算机网络教案社区

- 学术道德 (横向纵向查重, **认定抄袭后计0分**)
- Deadline means Deadline
补交得分 $S' = S \times \min(0.8, 0.95^D)$, 扣完为止。期末统计迟交情况
- 两个重要网址 (在线文档 & 实验平台)
<https://lab.cs.tsinghua.edu.cn/router/doc>
<https://lab.cs.tsinghua.edu.cn/tan>
- 仔细阅读文档, README, 注释, RFC
- 注意在DDL之前, 在TANlabs上**标记最终版本**