本章目录

硬件选型指标与通信机制

第九章 多机通信与智能组网

9.1 组网通信基础与背景需求

9.2 硬件选型指标与通信机制

9.3 软件分层与通信协议

9.4 通信建模与干扰仿真

9.5 RflySim组网框架与通信仿真

9.6 关键通信协议与开发接口

9.7 本章实验案例与综合验证

9.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

9.2.1 通信性能参数

教材对应：第9.1.3.1节

9.2.2 通信机制与抗干扰

教材对应：第9.1.3.2节

9.2.3 硬件特性与接口连接

教材对应：第9.1.3.3节

9.2.4 任务驱动选型算例

教材对应：第9.1.3节（综合应用）

9.2.1 通信性能参数：任务与选型维度

四节点状态交换需要什么

任务数据
状态／视频
→
链路指标
速率／时延
→
机载集成
供电／接口

教学假设：4节点、每节点50条/秒、100 B/条；节点之间交换状态。

选型约束：覆盖距离、可用容量、丢包与时延，和重量、供电同时满足。

通信候选：Wi-Fi、蜂窝、LoRa、卫星、毫米波、专用数据链；Mesh指网状组网。

9.2 硬件选型指标与通信机制

9.2.1 通信性能参数：图9.2总图

典型数据链参数表



工作频率：840MHz ~ 845MHz
传输技术：跳频/固定频率、透明传输、GMSK、4GFSK等
错误检测：32 位 CRC，ARQ
通信距离：参考距离：40km（地对空，郊区无遮挡，不同环境/配置下传输距离不同，请以实际使用为准）
发射功率：跳频：100mW ~ 1000mW（20dBm ~ 30dBm）
传输速率：最高 345Kbps
工作模式：点对点，中继模式
工作电压：12V ~ 60V
接口电流：睡眠: < 1mA；RX: 45mA ~ 98mA；TX（峰值）: 2A
工作温度：-40℃ ~ 85℃
尺　　寸：64.6mm × 39.7mm × 16.5mm
重　　量：共 86g；模块：55g；天线：31g
接　　口：串口(GHR-06V-S)；USB(TYPE-C)；天线(SMA内针)

图9.2 典型数据链产品参数

CRC（循环冗余校验）负责检错；ARQ（自动重传请求）负责重发。

9.2.1 通信性能参数：图9.2通信参数局部

通信参数要带测试条件

工作频率：840MHz ~ 845MHz
传输技术：跳频/固定频率、透明传输、GMSK、4GFSK等
错误检测：32 位 CRC，ARQ
通信距离：参考距离：40km（地对空，郊区无遮挡，不同环境/配置下传输距离不同，请以实际使用为准）
发射功率：跳频：100mW ~ 1000mW（20dBm ~ 30dBm）
传输速率：最高 345Kbps
工作模式：点对点，中继模式

图9.2（局部）通信参数

图中CRC检错、ARQ重发；速率与距离的最大值须分别核对测试条件。

9.2.1 通信性能参数：频段分类

频率与通信技术是两个维度

名称	频率含义	任务中的常见用法
VHF／UHF	甚高频30–300 MHz 特高频300 MHz–3 GHz	专网、中继与机地链路；频率范围本身不保证抗干扰
433／915 MHz	低于1 GHz的具体频段	常用于低数据量遥测；许可、功率与用途依地区而定
2.4／5 GHz	常见无线局域网频段	近距状态与视频；共享频谱会出现竞争
5.8 GHz	5 GHz附近的一组频率	图传常用；视距与天线条件影响覆盖

ISM指工业、科学和医疗用途；某频率在一地可用，不代表在各地均可免许可使用。

9.2.1 通信性能参数：Wi-Fi、LoRa与蜂窝

地面无线技术各有侧重

技术	主要任务	影响选择的条件
Wi-Fi／星闪	局部高速互联；星闪有SLE低功耗与SLB基础接入	频段、接入模式、设备能力和共享信道竞争
LoRa	低功耗、低数据量遥测采用啁啾扩频CSS	用更长空口时间换接收能力；速率依芯片与参数
4G LTE／5G NR	广域接入、视频、云端同步	覆盖、资费、上行能力与网络负载；高空覆盖另评估
5G-A	5G能力的进一步演进	能力取决于终端、网络与配置

教材“LoRa低于50 kbit/s”等数值用于低速场景理解，不作为所有器件的上限。

9.2.1 通信性能参数：卫星频段与条件

卫星链路扩大连接范围

频段／系统	教材定位	使用条件
L：1–2 GHz	移动终端、遥测与位置回传	业务速率与设备功耗取决于系统
Ku：12–18 GHz **Ka：26–40 GHz**	宽带卫星通信常用频段名称	实际业务频率另查；雨衰、遮挡与指向影响连接
低轨宽带星座	Starlink、GW、千帆等案例	卫星、地面网关与终端共同工作

教材2025年例：Starlink超过7600颗、20–50 ms。
星座数量和服务时延具有日期、地区与统计口径，不作为选型保证。

9.2.1 通信性能参数：特种有线链路

光纤连接改变部署约束

机载计算机
电信号 → 光电收发器
电／光转换 → 光纤链路
光信号 → 地面设备
还原与分发

收益：高数据量回传；光纤介质不受射频干扰，地面可集中计算。

限制：线缆重量、布放长度、弯折与钩挂约束机动；断纤会中断链路。

教材场景：4K/8K视频与数百米至数十千米布线是特定配置案例，并非通用能力。

9.2.1 通信性能参数：发射功率

发射功率的单位换算

$$P_{\mathrm{dBm}} = 10\log_{10}\left(\frac{P}{1\ \mathrm{mW}}\right)$$

射频输出功率	换算结果	比例
100 mW	20 dBm	作为本页比较基准
500 mW	约27 dBm	100 mW的5倍
1 W = 1000 mW	30 dBm	100 mW的10倍

dBm以1 mW为参考；P为射频输出功率，P_{dBm}为其dBm数值。
增大发射功率也增加供电与散热负担，距离提升并非同比例。

9.2.1 通信性能参数：带宽、速率与吞吐量

频谱带宽不等于数据速率

指标	定义／单位	教材例与解释
频谱带宽	信号占用或可分配频谱宽度 Hz、MHz	20／40 MHz；描述频率资源
数据速率	单位时间传输的比特量 bit/s、Mbit/s	如150 Mbit/s；须说明协议层
有效吞吐量	成功交付的应用内容／时间 bit/s	通常低于标称速率；丢包和开销占用容量

视频与点云先看有效容量，状态与指令还要看信息时效。

9.2.1 通信性能参数：距离与通信裕度

最远距离由整条链路决定

发射机
功率与编码 → 天线与环境
增益／损耗 → 接收机
灵敏度与解码

内部因素：天线方向性、馈线损耗、频率、调制编码、接收灵敏度共同作用。

外部因素：建筑、地形、植被、多径、同频干扰和天气会改变可用距离。

通信裕度：5/10/30 km是工况示例；接收信号相对解码门限的余量用来应对变化。

9.2.1 通信性能参数：链路可靠性

误码率与丢包率量的是不同对象

$$\mathrm{BER} = \frac{N_{\text{error bits}}}{N_{\text{observed bits}}} = \frac{10}{10^6} = 10^{-5}$$

$$\mathrm{PLR} = \frac{N_{\text{missing packets}}}{N_{\text{sent packets}}} = \frac{20}{1000} = 2\%$$

误码率BER：错误比特数除以观测比特数。
丢包率PLR：未到包数除以发送包数。
N为计数；两组数均为教学假设，各自统计窗口与包序号须一致。

工程含义：重传能恢复部分丢包，却占用容量并增加等待；过期状态仍可能无用。

9.2.1 通信性能参数：时延来源

端到端时延由哪些环节组成

排队／接入 → 发送比特 → 空间传播 → 解码／调度

$$t_{\text{prop}} = d/c = 100000/(3 \times 10^8) \approx 0.33\,\text{ms}$$

$$t_{\text{tx}} = 8L/R = 8 \times 1000/10^6 = 8\,\text{ms}$$

传播时延t_{prop}与发送时延t_{tx}的结果均以ms表示。
d为路径距离(m)，c为光速(m/s)，L为包长(B)，R为链路速率(bit/s)。
例中距离100 km、包长1000 B、速率1 Mbit/s；未计接入、处理与重传。
设备缓存、系统调度、协议处理与重传也计入端到端时延；门限由任务确定。

9.2.1 通信性能参数：时间戳与伪延迟

时钟偏差会污染单向时延

时刻／条件	发送端时间基准	接收端记录
发送	100 ms	接收钟比发送钟快30 ms
10 ms后到达	110 ms	140 ms
两端时间戳直接相减	真实耗时10 ms	表观时延40 ms

教学假设：固定时钟偏差30 ms；单向时延测量须先统一两端时间基准。
GNSS为全球卫星导航系统，PTP为精确时间协议，二者可用于对时。

本章目录

硬件选型指标与通信机制

第九章 多机通信与智能组网

9.1 组网通信基础与背景需求

9.2 硬件选型指标与通信机制

9.3 软件分层与通信协议

9.4 通信建模与干扰仿真

9.5 RflySim组网框架与通信仿真

9.6 关键通信协议与开发接口

9.7 本章实验案例与综合验证

9.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

9.2.1 通信性能参数

教材对应：第9.1.3.1节

9.2.2 通信机制与抗干扰

教材对应：第9.1.3.2节

9.2.3 硬件特性与接口连接

教材对应：第9.1.3.3节

9.2.4 任务驱动选型算例

教材对应：第9.1.3节（综合应用）

9.2.2 通信机制与抗干扰：点对点、星形、中继与多跳

工作模式改变转发负担

模式	数据路径	主要取舍
点对点	A直接到B	路径简单；覆盖受单条链路限制
星形	A经中心到B	统一管理；中心负载与单点故障
中继	A经过B到C	扩展覆盖；多一次转发开销
多跳自组织	节点发现邻居并维护路径	适应拓扑变化；增加路由维护开销

星形也是网络；多跳带来路径选择能力，同时增加各跳的接入与转发负担。

9.2.2 通信机制与抗干扰：QPSK、16QAM与GMSK

调制在速率与辨认难度间取舍

方式	信号怎样表示信息	收益与代价
QPSK **四相移键控**	4种相位，每码元2 bit	状态间隔较大；相同码元率下数据量较少
16QAM **16阶正交幅度调制**	16种幅度／相位状态 每码元4 bit	同码元率比QPSK多载比特；要求更好的信噪比
GMSK **高斯最小频移键控**	高斯滤波后连续相位调制 恒包络	频谱较紧凑，适于高效功放；速率取决于配置

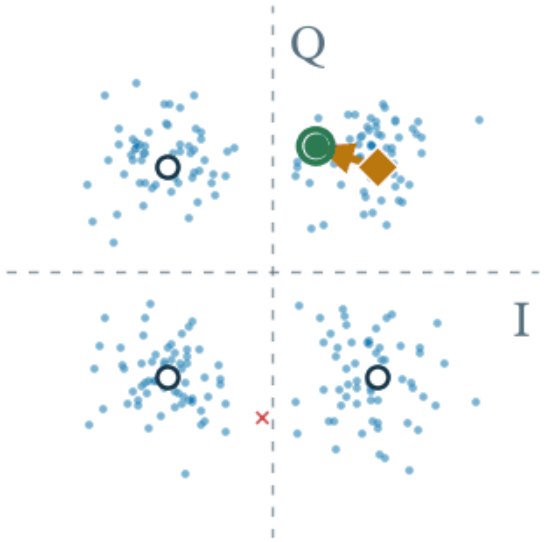
码元是一次可区分的信号状态；LoRa采用CSS啁啾扩频，不是GMSK。

9.2.2 通信机制与抗干扰：星座与判决

噪声把接收点推过边界，就会判成另一个码元

同平均码元能量 $E_s = 1$　　同AWGN样本 $\sigma_{I,Q} = 0.24$

QPSK · 2 bit/码元



发送 → 判决

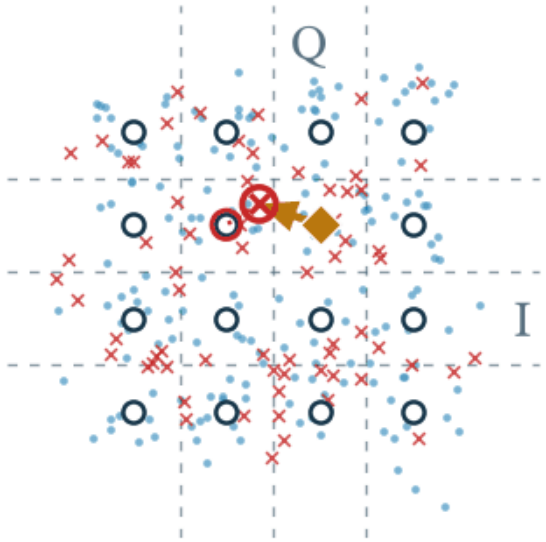
11 → 11

◆ 该码元判对

$d_{min} = 1.414$

错码元 1/256

16QAM · 4 bit/码元



发送 → 判决

1111 → 0111

◆ 该码元错 1 bit

$d_{min} = 0.632$

错码元 68/256

未编码　　○ 理想点　　• 接收点　　× 判错点　　----- 判决边界

图：I/Q为正交分量，AWGN为加性白高斯噪声，$d_{\min}$为最小点距

9.2.2 通信机制与抗干扰：FHSS与DSSS

跳频与直接序列扩频

FHSS：随时间切换频点

频点1 | 频点3 | 频点2 | 频点1

时间推进，收发使用同一序列

DSSS：比特映射为码片序列

数据比特 → 更快的码片序列

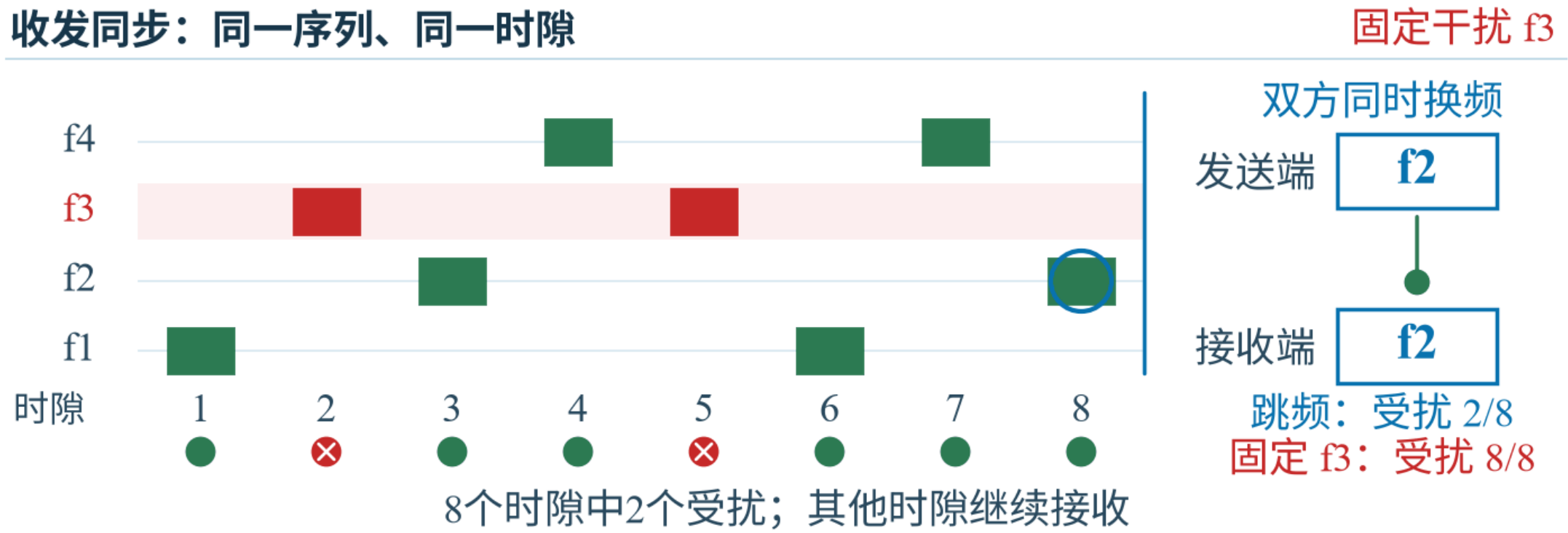
接收端相关解扩恢复信息。
码片是扩频码中的基本单元。

抗干扰作用：跳频使窄带干扰只影响部分频点。
直接序列扩频用相关解扩抑制不相关干扰。

共同代价：同步、频谱或时间开销；效果受干扰带宽、强度与信道条件限制。

9.2.2 通信机制与抗干扰：跳频同步

收发同步跳频，窄带干扰只覆盖部分时隙



图：收发同步跳频与固定窄带干扰的时隙重叠示意

收发端须保持序列和时隙同步；窄带干扰仍会破坏重叠时隙。

9.2.2 通信机制与抗干扰：透明传输

透传负责搬运字节

发送应用 编码消息 → 透传模块 搬运字节 → 透传模块 输出字节 → 接收应用 按格式解析

语义约定：双方统一字段顺序、单位、帧边界与版本，才能正确解释数据。

可叠加协议：MAVLink无人系统消息、NMEA导航语句、Modbus工业通信。

设备行为：透明针对上层语义；底层可以有缓存、CRC检错与ARQ重传。

9.2.2 通信机制与抗干扰：Parity、CRC、FEC与ARQ

检错、纠错与重传分别做什么

机制	动作	代价／限制
奇偶校验／CRC	奇偶位／循环冗余校验检测错误	可能存在漏检；不自动纠正或重传
FEC：前向纠错	加冗余码，接收端纠正部分错误 例：Reed-Solomon、卷积编码	占用码率与计算资源；纠错能力有限
ARQ：自动重传请求	ACK确认收到；NACK否定确认 收到NACK或超时未获ACK则重发	需反馈；占容量、增时延
HARQ：混合ARQ	纠错编码与重传结合	权衡冗余、重传次数与时效

9.2.2 通信机制与抗干扰：可靠性与时效算例

重传成功还要赶上截止时间

教学时序	链路事件	应用判断
0 ms	生成并发送状态	截止时间设为25 ms
10 ms	首发失败	还没有可用状态
20 ms	超时并重发	等待占用时间预算
30 ms	重传成功	正确但过期：超过25 ms截止时间

这些时间均为教学假设。错误恢复是否有价值，取决于恢复后的数据是否仍可使用。

本章目录

硬件选型指标与通信机制

第九章 多机通信与智能组网

9.1 组网通信基础与背景需求

9.2 硬件选型指标与通信机制

9.3 软件分层与通信协议

9.4 通信建模与干扰仿真

9.5 RflySim组网框架与通信仿真

9.6 关键通信协议与开发接口

9.7 本章实验案例与综合验证

9.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

9.2.1 通信性能参数

教材对应：第9.1.3.1节

9.2.2 通信机制与抗干扰

教材对应：第9.1.3.2节

9.2.3 硬件特性与接口连接

教材对应：第9.1.3.3节

9.2.4 任务驱动选型算例

教材对应：第9.1.3节（综合应用）

9.2.3 硬件特性与接口连接：图9.2硬件参数局部

供电与接口也在参数表里

工作电压：12V ~ 60V
接口电流：睡眠: < 1mA； RX: 45mA ~ 98mA； TX（峰值）: 2A
工作温度：-40℃ ~ 85℃
尺　　寸：64.6mm × 39.7mm × 16.5mm
重　　量：共 86g；模块：55g；天线：31g
接　　口：串口(GHR-06V-S)；USB(TYPE-C)；天线(SMA内针)

图9.2（局部）硬件与接口参数

峰值电流决定瞬态供电能力；整机重量还应包含天线、线缆、转接与固定件。

9.2.3 硬件特性与接口连接：机载集成与供电算例

尺寸、重量与电源共同约束集成

教材另一规格示例（非图9.2）	集成含义
80 mm × 60 mm × 20 mm，90 g	预留安装、散热、天线与线缆空间
工作电压5–12 V，工作功率约2 W	核对稳态、启动与发射峰值供电

$$E = P_{\mathrm{in}} t = 2\,\mathrm{W} \times 0.5\,\mathrm{h} = 1\,\mathrm{Wh}$$

教学假设：P_{in}为输入功率，恒为2 W；E为电能(Wh)，t为时间(h)。
模块工作30 min消耗1 Wh；未计电源转换损耗。

9.2.3 硬件特性与接口连接：GH、Type-C、RJ45与圆形连接器

连接器外形不承诺数据速率

外形／系列	典型连接	真正决定能力的条件
GH 1.25 mm	自驾仪遥测口（TELEM） 常见6针，也有其他针数	针脚定义、电平、承载信号与固定可靠性
USB Type-C	机载计算机、地面设备	端口与线缆的USB／雷电版本及供电协商
RJ45	以太网连接	PHY物理接口芯片、线缆与双方速率；外形不定速率
圆形多针连接器	MIL-DTL-38999 M12、GX系列	各系列锁定、防水、温度与重量不同；按型号核对

9.2.3 硬件特性与接口连接：接口检查与连接路径

把机械、电气和协议逐层接通

连接器
形态／锁扣 → 电气信号
电平／针脚 → 链路设置
速率／帧格式 → 消息协议
字段／语义

串口例： UART＝通用异步收发器；发送TX接对方接收RX，并核对地与逻辑电平。

防护与安装： 盲插、锁定、抗振、防水取决于型号与装配状态，不能从外形推定。

混合信号例： Mid-360配套线缆分出电源与以太网；按厂商针脚表接线。

9.2.3 硬件特性与接口连接：SMA、TNC与MMCX

天线接口先匹配再看损耗

接口	机械特点	检查项
SMA／RP-SMA	小型螺纹同轴；反极性改变中心接触件配对	公母、中心针孔、阻抗、支持频率与馈线损耗
TNC	螺纹锁定同轴连接	振动环境、紧固和额定频率；常见于可靠连接
MMCX	微型卡扣同轴连接	机内空间、插拔与线缆固定；常用于小型射频设备

教材常见频率示例：SMA 18 GHz、TNC 11 GHz、MMCX 6 GHz。
不同系列额定值不同；接头、馈线和天线都应覆盖实际工作频率。

本章目录

硬件选型指标与通信机制

第九章 多机通信与智能组网

9.1 组网通信基础与背景需求

9.2 硬件选型指标与通信机制

9.3 软件分层与通信协议

9.4 通信建模与干扰仿真

9.5 RflySim组网框架与通信仿真

9.6 关键通信协议与开发接口

9.7 本章实验案例与综合验证

9.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

9.2.1 通信性能参数

教材对应：第9.1.3.1节

9.2.2 通信机制与抗干扰

教材对应：第9.1.3.2节

9.2.3 硬件特性与接口连接

教材对应：第9.1.3.3节

9.2.4 任务驱动选型算例

教材对应：第9.1.3节（综合应用）

9.2.4 任务驱动选型算例：有效负载预算

先算应用产生多少有效数据

假设4节点，每节点50条/秒，每条有效负载100 B。
N为节点数，f为消息频率，L为每条有效字节数。

$$R_{\text{payload}} = NfL \times 8 = 4 \times 50 \times 100 \times 8 = 160000\,\text{bit/s}$$

$$R_{\text{unicast}} = (N-1)R_{\text{payload}} = 3 \times 160 = 480\,\text{kbit/s}$$

R_{payload}为各节点有效数据率之和；R_{unicast}为逐一单播的总发送速率。
广播：每条发一份，共160 kbit/s；单播：分别发给其余3节点，共480 kbit/s。
这里只统计源端负载，未计包头、接入、多跳转发与重传。

9.2.4 任务驱动选型算例：协议与重传开销

容量预算加入包头与余量

教学假设：头部$H = 40\,\mathrm{B}$，重传系数$\alpha = 1.2$，规划利用率上限$u = 0.60$。
4节点各50条/秒、100 B/条；每条初发一份，重发由系数计入。

$$R = Nf(L + H) \times 8\alpha = 4 \times 50 \times 140 \times 8 \times 1.2 = 268.8\,\mathrm{kbit/s}$$

$$C_{\min} = R/u = 268.8/0.60 = 448\,\mathrm{kbit/s}$$

R含包头与重发负担；$C_{\min}$为按利用率上限预留余量后的容量下限。
规划负载至多占容量的60%；比较速率须与R采用同一计量口径。
另假设速率345 kbit/s，低于448 kbit/s下限；不取自图9.2。

9.2.4 任务驱动选型算例：业务容量比较

状态与视频不能共用一个预算

业务（教学假设）	四节点有效数据量	选型关注点
状态100 B、50 Hz	0.16 Mbit/s，源端各发一次	时效、丢包与队列
压缩视频2 Mbit/s／节点	8 Mbit/s	上行容量、编码与缓存
状态＋视频	8.16 Mbit/s，未计协议开销	业务隔离、限速与拥塞时的降级

$$R_{\mathrm{raw}} = 1280 \times 720 \times 3 \times 8 \times 30 \approx 663.6\,\mathrm{Mbit/s}$$

R_{raw}为单节点原始视频数据率；画面为1280×720像素。
无压缩RGB含红、绿、蓝三通道，各8 bit；30帧/秒。

9.2.4 任务驱动选型算例：离散更新与结果

队列会把容量不足变成等待

教学假设：每20 ms生成400 B，服务速率120 kbit/s，每周期可发300 B。
Q为周期末排队字节数；初值为0，不计包头与随机接入。

$$Q_{k+1} = \max(0, Q_k + 400 - 300), \quad Q_0 = 0$$

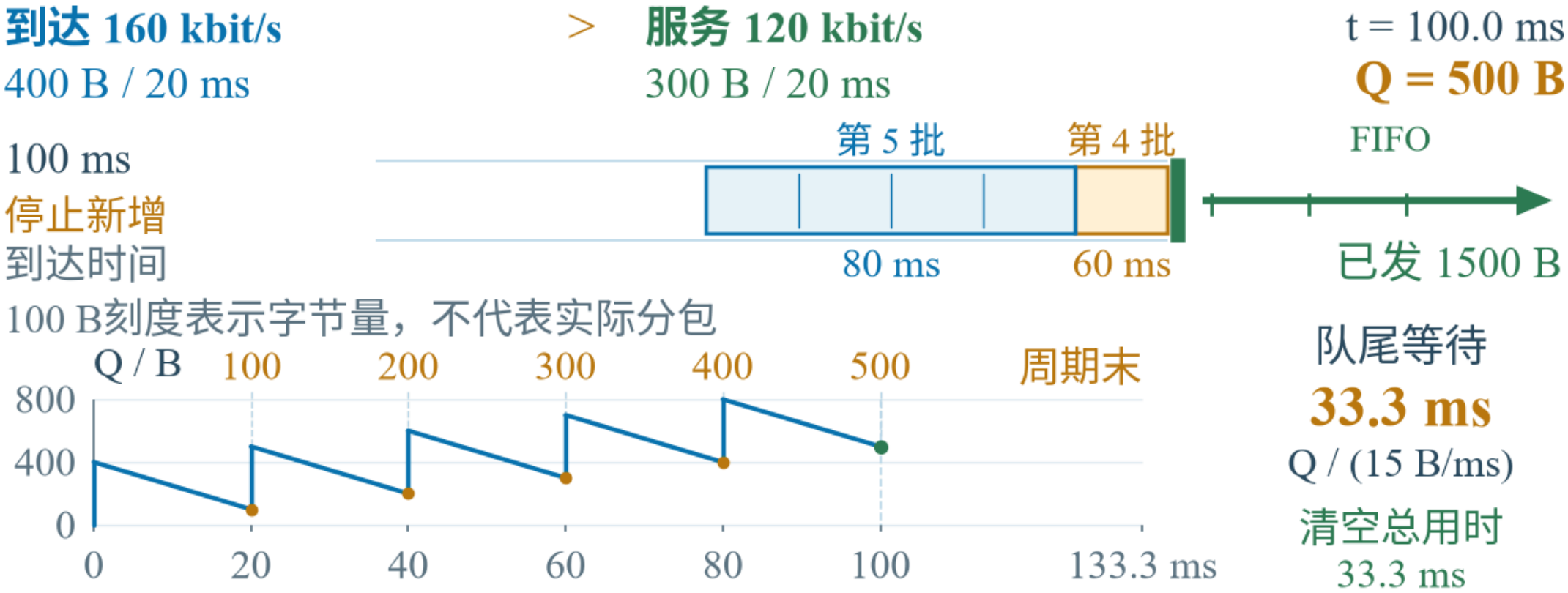
周期末k	1	2	3	4	5
排队字节Q	100	200	300	400	500

$$t_{\text{drain}} = 500 \times 8/120000 \approx 33.3\,\text{ms}$$

停止新增后，t_{drain}表示清空500 B存量所需时间，约33.3 ms。
持续新增时，队列每周期多100 B，直至丢弃或降级。

9.2.4 任务驱动选型算例：队列动态

发送速度赶不上生成速度，消息就在缓冲区积压



图：按先到先发（FIFO）排队；每20 ms新增400 B，链路只能发300 B

练习与讨论

为四节点任务选择通信配置

问题1：假设4节点、50 Hz、100 B/条，头部40 B、系数1.2、利用率上限0.60。另假设链路速率345 kbit/s，是否满足容量预算？

问题2：更新频率改为25 Hz，容量下限变为多少？时效会付出什么代价？

问题3：Type-C能够插接，但设备只支持低速数据模式；应如何排查和解释？

参考要点

容量、时效与接口的参考判断

问题	参考结果	判断边界
1	448 kbit/s > 345 kbit/s 本例规划不满足	345 kbit/s是独立教学假设 不由图9.2推定
2	224 kbit/s 生成间隔20 ms变40 ms	容量压力减半，但新状态生成更慢
3	核对端口模式、线缆、电气 配置及消息格式	Type-C外形不自动保证40 Gbit/s

本节小结

用任务指标约束硬件选择

预算：消息大小、频率、发送份数决定负载；包头、重传与转发消耗容量。

机制：调制、扩频、纠错与重传改变效率和时效，效果受实际信道约束。

集成：尺寸、功耗、连接器、电气信号和协议必须逐项匹配。

易错点：频率不是技术名，MHz不是Mbit/s，射频功率不是总功耗，正确到达也可能过期。