本章目录

软件分层与通信协议

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

9.3.1 网络分层
教材对应：第9.1.4节第1项

9.3.2 通信协议与软件角色
教材对应：第9.1.4节第2项

9.3.3 组网方式与路由协议
教材对应：第9.1.4节第3项

9.3.4 路由设计趋势与选型
教材对应：第9.1.4节第4项

9.3.1 网络分层：分层任务概览

一条状态消息需要三类约定

消息语义 位置／单位／时间	→	端点交付 主机／程序	→	逐跳传输 下一跳／信号

消息协议：约定字段与含义；中间件进一步管理数据发现、匹配与分发。

网络与传输：IP负责寻址和转发，UDP／TCP把数据交给端口对应的程序。

链路与物理：每一跳封装成帧，在无线电、铜缆或光纤中传输。

9.3.1 网络分层：图9.3与层次映射

网络分层模型

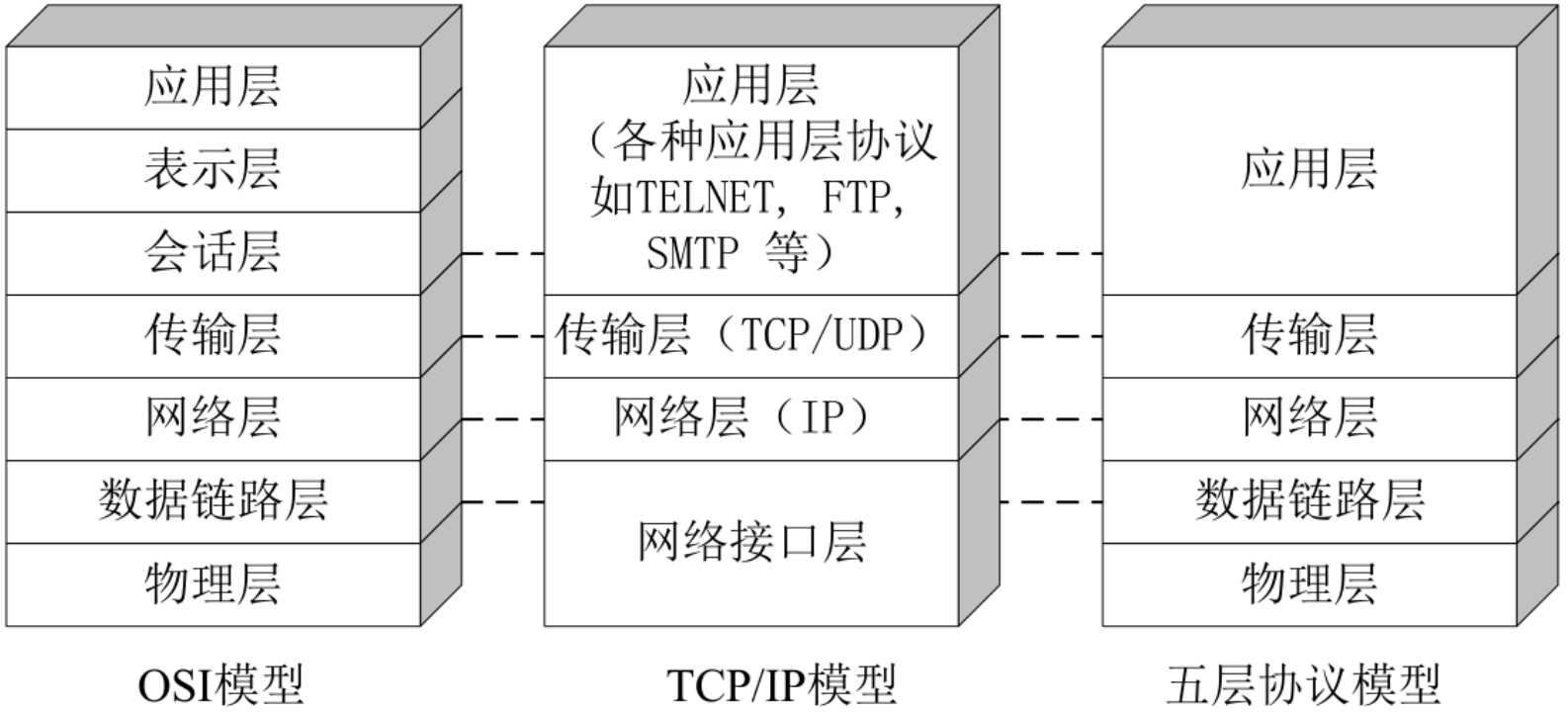


图9.3 网络分层模型

OSI用于职责定位，TCP/IP对应实际协议栈；五层模型再分出链路与物理。

9.3.1 网络分层：物理、链路、网络、传输、应用

五层分别解决什么问题

层次	核心职责	无人系统实例
应用	消息语义、编码、会话	状态字段、任务指令、视频会话
传输	端口与端到端传输语义	UDP数据报，TCP可靠有序字节流
网络	逻辑地址与跨网转发	IP地址、路由表、下一跳
数据链路	邻接节点之间的帧传输	以太网／Wi-Fi帧；PPP点对点链路
物理	比特到电／光／无线信号	调制、频段、功率、收发器

9.3.1 网络分层：应用消息到链路帧

发送端逐层封装

应用消息	节点编号、时间戳、位置与速度
UDP数据报	UDP头：源／目的端口 ＋ 应用消息
IP包	IP头：源／目的IP地址 ＋ UDP数据报
本跳链路帧	链路头／校验 ＋ IP包；再调制成信号

9.3.1 网络分层：解封装与地址边界

接收端逐层还原消息

信号／帧 → IP包 → UDP端口 → 消息解析

标识	用于定位	边界
链路地址	本跳的链路端点	路由转发会改变链路封装
IP地址＋端口	主机网络端点＋传输端点	端口不是载具编号
消息内节点编号	具体载具或组件	随应用协议解释；串口也可以使用

9.3.1 网络分层：传输层取舍

UDP与TCP提供不同交付语义

比较项	UDP：用户数据报协议	TCP：传输控制协议
数据边界	一个个数据报	有序字节流；应用自己分帧
可靠性	不内置确认、重传与排序	序号、确认、重传与流量／拥塞控制
时效代价	小开销；应用负责丢失处理	缺失前段会使后续交付等待
常见选择	高频状态、允许丢旧样本的流	文件、配置与完整性优先的会话

UDP不自动保证低时延；TCP不保证截止时间。任务命令仍需应用级确认与去重。

9.3.1 网络分层：分层调试

按故障所在层定位问题

观察到的现象	优先定位	核对对象
本跳没有连接	物理／链路	供电、频段、调制 介质访问与邻接
本地可通，跨网不通	网络	地址、路由表、下一跳 NAT：网络地址转换
主机收到包，应用收不到	传输与主机配置	协议、端口、绑定地址与过滤
有字节，数值或时间不对	应用语义	字段布局、单位与字节序 协议版本与时钟

本章目录

软件分层与通信协议

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

9.3.1 网络分层
教材对应：第9.1.4节第1项

9.3.2 通信协议与软件角色
教材对应：第9.1.4节第2项

9.3.3 组网方式与路由协议
教材对应：第9.1.4节第3项

9.3.4 路由设计趋势与选型
教材对应：第9.1.4节第4项

9.3.2 通信协议与软件角色：轻量无人系统消息

MAVLink约定消息格式

状态／命令 结构化字段 → MAVLink编码 消息字节 → 串口或UDP 传输通路 → MAVLink解析 还原字段

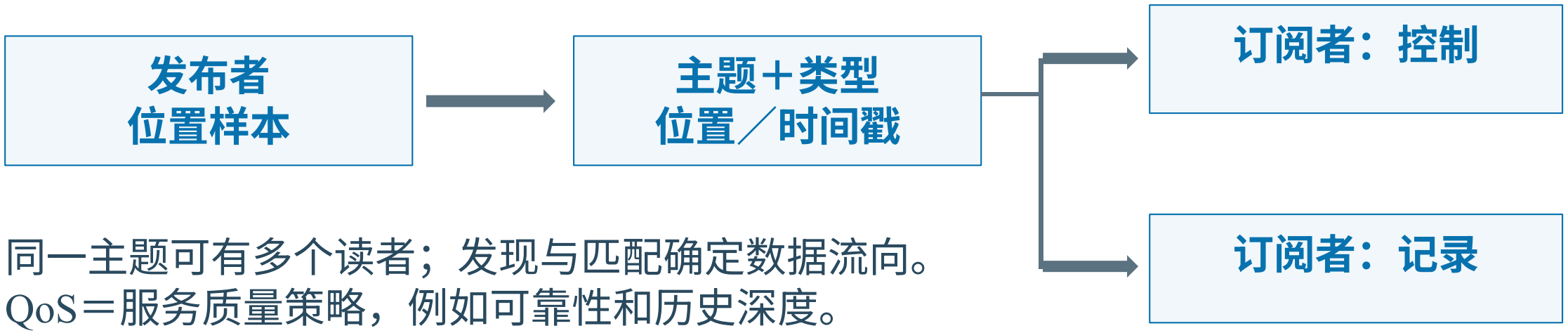
最小例子：自驾仪发布心跳和位置，地面站据消息类型与载具编号更新显示。

输入输出：字段与类型定义进入编码器，接收字节进入解析器，输出结构化消息。

相邻关系：选用UDP时仍需IP与链路；MAVLink的系统编号不能代替IP地址。

9.3.2 通信协议与软件角色：发布订阅中间件

DDS围绕数据主题匹配收发端



同一主题可有多个读者；发现与匹配确定数据流向。
QoS＝服务质量策略，例如可靠性和历史深度。

最小例：位置主题供控制器与日志读取；各读者分别配置缓存深度与数据时效。

9.3.2 通信协议与软件角色：框架与RMW

ROS 2组织应用，中间件负责通信

ROS 2节点
感知／控制
→
RMW接口
中间件抽象
→
DDS等实现
发现与分发

ROS 2对象	最小用途	通信结果
话题	发布位置与传感器数据	订阅端连续得到样本
服务	请求一次参数或状态	收到一次响应
动作	启动持续一段时间的任务	过程反馈与最终结果

ROS 2不是单个协议；MAVLink、DDS与ROS 2可独立使用，也可经适配器组合。

9.3.2 通信协议与软件角色：远程发布订阅

MQTT通过代理分发主题消息

无人节点
发布状态 → 代理服务器
按主题转发 → 监控／任务程序
订阅主题

QoS级别	MQTT逐段交付语义	工程影响
0	至多一次	无确认重试，消息可能丢失
1	至少一次	可能重复；需去重或幂等（重复执行不改变结果）
2	恰好一次（协议交付）	交互较多；动作执行仍需确认

发布端到代理、代理到订阅端分别约定QoS；可达性与会话配置仍影响交付。

9.3.2 通信协议与软件角色：数据存储与发布订阅

Redis提供数据共享与消息功能

用法	输入／输出	最小例与限制
键值共享	写入状态；读取当前保存值	仿真写位置，监控读取 须处理过期与并发
Pub/Sub频道	发布事件；在线订阅端接收	广播状态更新通知 断线后不会自动补收
Streams数据流	追加条目；按记录读取	需回读与消费确认时可选

数据存储、实时通知与可靠消息队列是不同语义。

9.3.2 通信协议与软件角色：视频会话与媒体承载

RTSP控制会话，媒体另有通路



输入输出： RTSP请求得到响应；RTP送视频，RTCP反馈统计。

最小例子： 建立摄像头会话后持续读取视频帧；位置与命令继续用各自的消息通路。

本章目录

软件分层与通信协议

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

9.3.1 网络分层

教材对应：第9.1.4节第1项

9.3.2 通信协议与软件角色

教材对应：第9.1.4节第2项

9.3.3 组网方式与路由协议

教材对应：第9.1.4节第3项

9.3.4 路由设计趋势与选型

教材对应：第9.1.4节第4项

9.3.3 组网方式与路由协议：图9.4总图

点对点与组网通信方式

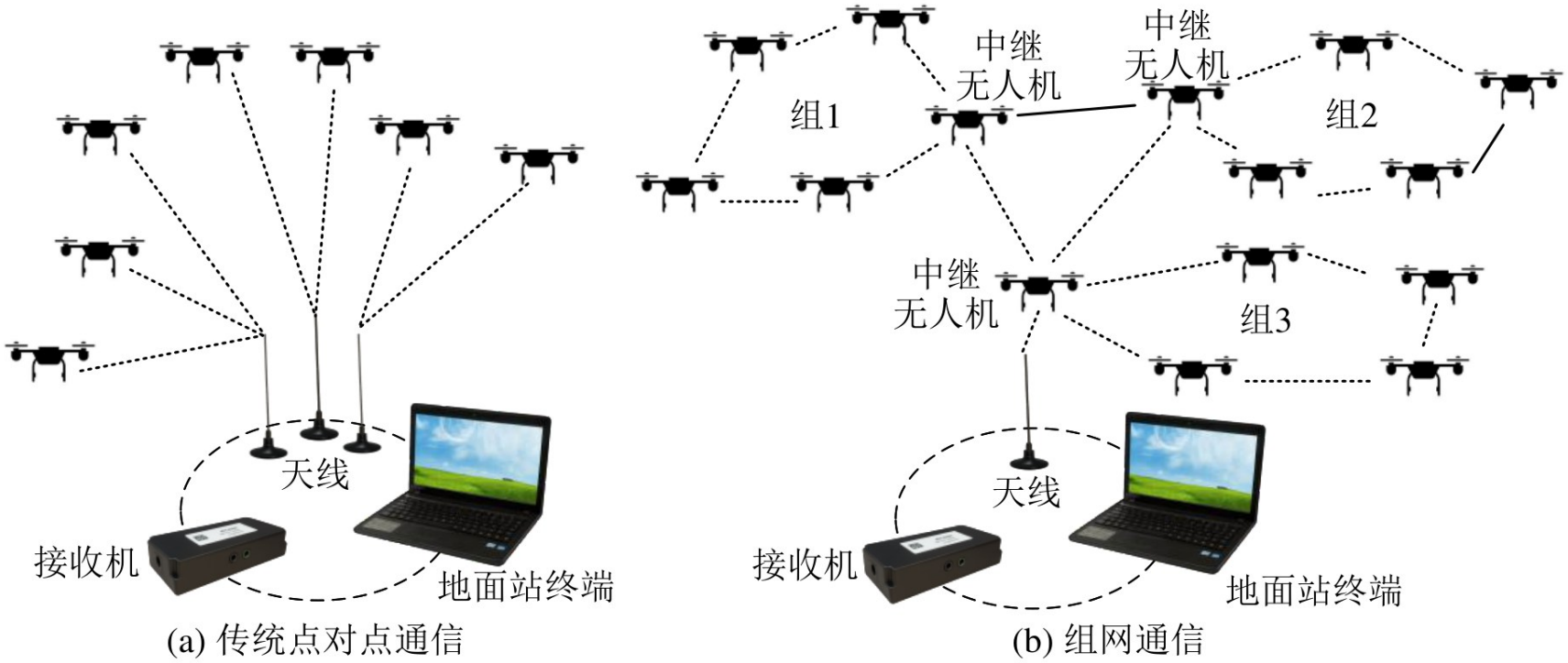


图9.4 点对点与组网通信方式

观察数据是否经过中心或中继，以及哪个节点承担转发；拓扑不等于具体路由协议。

9.3.3 组网方式与路由协议：图9.4左侧局部

跨机共享依赖地面端转发



(a) 传统点对点通信

图9.4（a）传统点对点通信

连接：无线链路汇聚到地面接收系统。

共享：跨节点信息是否可达，取决于地面端是否转发。

取舍：统一管理方便；中心负载、故障与覆盖限制协同范围。

9.3.3 组网方式与路由协议：图9.4右侧局部

分组与中继形成多跳通路

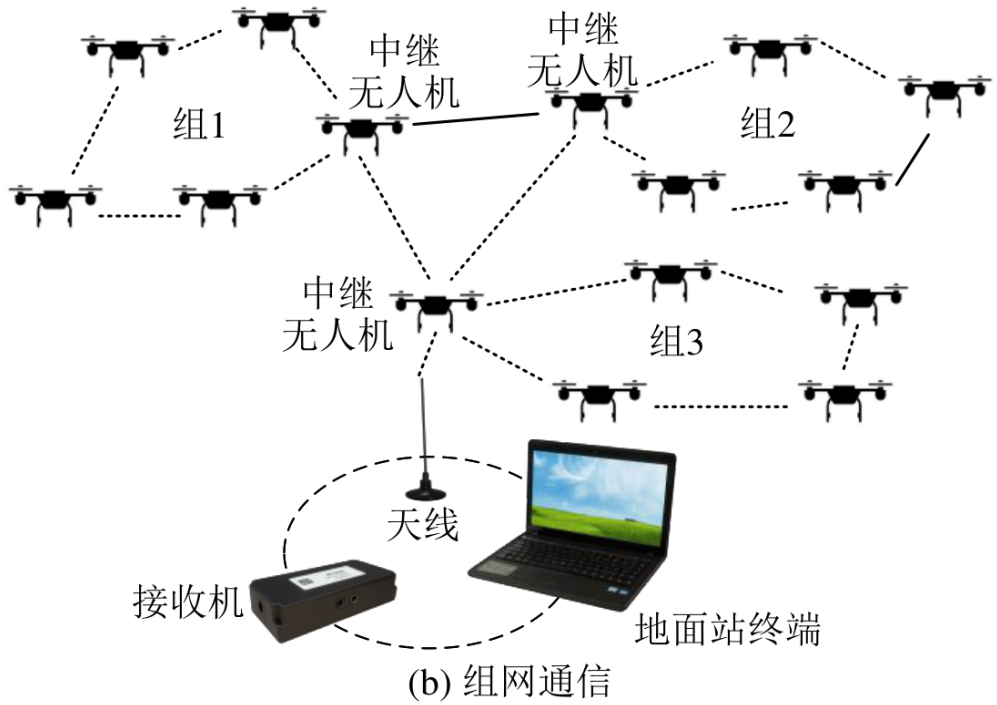


图9.4（b）组网通信

组内：局部节点交换状态。

组间：中继承担跨组转发。

约束：路径会因移动而失效；中继可能成为容量瓶颈。

9.3.3 组网方式与路由协议：FANET的特性

飞行自组网的链路持续变化

网络类别	运动与连接特点	路由关注点
MANET：移动自组网	无固定基础设施的移动节点	邻居变化、分区与维护开销
VANET：车载自组网	道路约束下的移动	交通密度、路口、遮挡与速度
FANET：飞行自组网	三维运动、方向与高度变化	链路寿命、状态时效 负载与能量

FANET专指飞行自组网，不泛指所有无人网络；相关协议可供其他载具借鉴。

9.3.3 组网方式与路由协议：消息分发范围

单播、组播、广播选择接收范围

模式	目标范围	无人系统示例
单播	一个目标端点	给一台载具下发参数
组播／多播	加入指定组的端点	向参与同一任务的成员发布状态
广播	限定广播域中的所有端点	邻居发现或本地状态发布

接收范围、物理拓扑、路由机制是三个可以组合的维度。

9.3.3 组网方式与路由协议：路由与转发

路由先建立信息，转发再使用信息

控制消息
发现与更新 → 路径信息
路由表／源路由 → 数据包转发
选择下一跳

策略	何时建立路径知识	主要代价
主动式	有无数据都维护更新	持续维护；信息仍会过期
响应式／按需式	有数据需求时发起发现	首包等待；断路后重新发现
混合／位置辅助	按组织方式或可用位置组合	依赖拓扑、定位或实现能力

9.3.3 组网方式与路由协议：主动式协议

OLSR与DSDV提前维护路径

比较项	OLSR	DSDV
名称	优化链路状态路由	目标序列距离向量路由
维护对象	邻居和拓扑信息	到各目的地的距离／下一跳
关键机制	Hello发现邻居； 多点中继（MPR）减少重复转发	序列号区分新旧路由， 周期与触发更新
取舍	有路可发；拓扑控制占容量	查表直接；更新开销随变化增长

主动维护通常适合持续交换数据的场景；移动快时仍须平衡更新周期与控制开销。

9.3.3 组网方式与路由协议：响应式协议

AODV与DSR在需求出现后找路

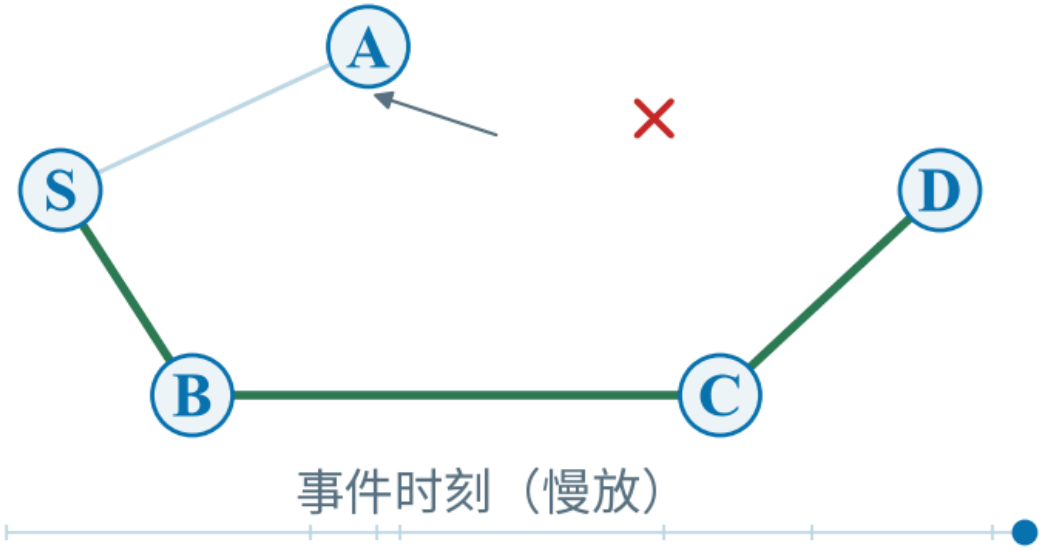
需要发送
暂无有效路径
→
RREQ路由请求
RREP路由应答
→
发送数据
断路时维护

比较项	AODV	DSR
名称	按需距离向量路由	动态源路由
路径表示	各节点维护下一跳；序列号 帮助防止采用过旧路由	数据包携带源路由； 节点也可以缓存路径
主要代价	发现等待与断路维护	路径越长，源路由包头越大

9.3.3 组网方式与路由协议：AODV断路维护

断链后，AODV逐步建立替代路径

AODV：节点移动后，恢复需要控制消息传播



S 的本地表项

到 D：下一跳 B

旧包丢失：1

DATA

新数据已到 D

t = 12.4

新数据经 S-B-C-D 到达

图：AODV断路恢复示意；RERR为路由错误报文

本例由链路层检测失败，不做局部修复；S收到路由应答后恢复发送。

9.3.3 组网方式与路由协议：混合路径选择

HWMP在二层选择Mesh路径

IP包 网络层	→	802.11s Mesh HWMP二层选路	→	无线链路 逐跳转发

链路层（二层）机制：按需发现路径；配置根节点后可采用主动维护机制。

部署依赖：网卡、驱动与Mesh配置支持对应功能，节点之间能够互操作。

归层边界：HWMP选Mesh内路径；OLSR、AODV多在IP层选路，二者不必串行。

9.3.3 组网方式与路由协议：位置辅助路由

GPSR按位置选择下一跳



教学示意：A的可达邻居中，B距D最近且比A更近，因此选B。
假设位置有效；目的地与邻居位置由定位和位置服务提供。

状态	转发动作	限制
存在更近邻居	贪婪转发	只据几何距离不保证最低时延
没有更近邻居	周边恢复，绕过局部最小	经典算法依赖平面化条件 三维扩展需另设计

本章目录

软件分层与通信协议

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

9.3.1 网络分层

教材对应：第9.1.4节第1项

9.3.2 通信协议与软件角色

教材对应：第9.1.4节第2项

9.3.3 组网方式与路由协议

教材对应：第9.1.4节第3项

9.3.4 路由设计趋势与选型

教材对应：第9.1.4节第4项

9.3.4 路由设计趋势与选型：时延、可靠性与负载

路径选择先规定任务约束

候选路径（假设）	端到端时延	交付成功率
A直接到C	40 ms	92%
A到B，再到C	10＋15＝25 ms	98% × 99%＝97.02%

$$p_{\text{path}} = p_{AB}p_{BC} = 0.98 \times 0.99 = 0.9702$$

教学门限：时延不超过30 ms、成功率至少95%；本例选择A-B-C。

p_{path}、p_{AB}、p_{BC}分别为整条路径、A到B、B到C的成功概率。

假设两跳独立、无重传；给定时延不含路由发现等待。

9.3.4 路由设计趋势与选型：按需、链路状态、位置与预测

移动预测帮助提前维护路径

设计方向	利用的信息	得到什么／付出什么
按需构建	当前业务需求	减少无业务维护；首次发现要等待
链路状态更新	邻居与链路质量	较新路径信息；周期更新占容量
位置辅助	GNSS、视觉或融合定位	缩小候选下一跳；依赖定位精度与时效
动态状态预测	速度、航向、轨迹 卡尔曼／学习模型	用蚁群／粒子群等搜索路径 预测误差可能导致错误切换

链路寿命预测支持提前换路，路径搜索算法负责比较候选通路。

9.3.4 路由设计趋势与选型：新兴路由设计方向

能量、分层和断续连接

方向	怎样改变转发	适用边界
能量感知	选择余量较高的中继，轮换负担	可能增加路程、跳数或时延
分层／分簇	簇内局部交换，簇首跨组转发	需设计簇首负载、选举及失效恢复
DTN：延迟容忍网络	存储、携带、遇到接触再转发	断续连接可用 适于可延后交付的数据

9.3.4 路由设计趋势与选型：有限时序决策例

选型结论随条件更新

教学时刻	候选路径／给定性能	按门限的选择
0 s	A-B-C：25 ms，97.02% A-C：40 ms，92%	选A-B-C
2 s	A-B-C：45 ms，97% A-D-C：28 ms，96%	切换A-D-C
4 s	可用路径均大于30 ms 或成功率小于95%	约束不满足 降级或改变任务

比较还应记录发现等待、控制流量、RSSI接收信号强度、吞吐、能耗和节点负载。

练习与讨论

为三类业务选择软件与路由

任务1：高频状态允许丢旧样本，日志要求完整，视频要求连续；分别选什么通路?

任务2：持续互发状态与偶发远程请求，主动式／按需式路由的取舍怎样变化?

辨析：TCP收到＝命令执行？分簇图＝OLSR？有坐标＝GPSR在三维中一定可用?

参考要点

按业务语义给出选择理由

问题	参考选择	必要条件
三类业务	状态：MAVLink或DDS等 日志：TCP等可靠传输 视频：RTSP会话＋RTP媒体	状态时间戳与过期策略 日志完整性；视频编码与缓存
路由机制	持续流可考虑主动； 偶发流可考虑按需	控制开销、首包等待与拓扑变化共同评估
三项辨析	三项均不能直接成立	应用执行确认；协议实际配置；位置时效与三维适配

本节小结

把语义、交付和路径分别设计

消息与软件：字段、单位、发现和分发必须匹配；工具可独立使用或组合。

交付与时效：可靠有序、数据新鲜和命令执行是不同要求，分别规定判据。

路由与组网：接收范围、拓扑和维护机制分开选；路径优劣取决于任务与当前条件。

易错点：DDS不与UDP同层，ROS 2不等于单个协议，HWMP负责二层Mesh选路。