



9.7 本章实验案例与综合验证



本章目录

本章实验案例与综合验证

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

9.7.1 例程体系与最小接口实验

教材对应：第9.3.1节，接口学习实验

9.7.2 多机通信与粗粒度仿真

教材对应：第9.3.1节，基本使用与进阶开发

9.7.3 联合仿真与高阶案例

教材对应：第9.3.1-9.3.2节，图9.10

9.7.4 结果解释与综合验证

教材对应：第9.3节，案例综合验证





9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.1 例程体系与最小接口实验：教材实验列表

实验分类与学习任务

共同父目录：[安装目录]/RflySimAPIs/9.RflySimComm/

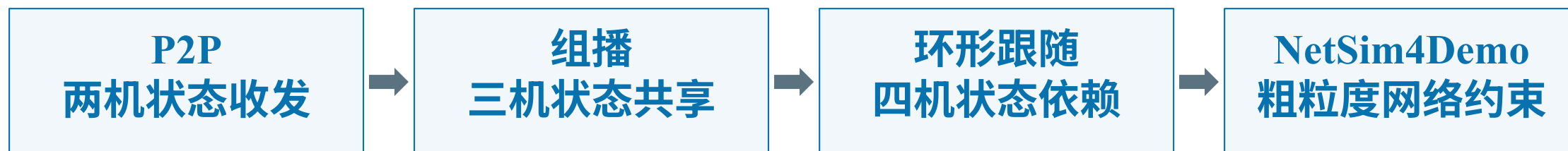
教材分类与目录	要回答的问题	代表资源
接口学习 0.ApiExps	数据如何发出、寻址和解析？	RflySim接口、DDS、MAVLink、MQTT、Redis、NS-3、组播
基本使用 1.BasicExps	通信怎样嵌入多机控制？	RflySim接口以及DDS、MQTT、Redis多机案例
进阶开发 2.AdvExps	约束网络后任务如何变化？	粗粒度仿真、资源分配、路由仿真专题

选题查 Index.pdf，步骤查例程内 Readme.pdf，接口说明查 API.pdf。



9.7.1 例程体系与最小接口实验：同一组状态数据

四阶段默认实验路线



阶段	输入与操作	判断证据
两机 / 三机	固定载具ID、端口和状态字段	源ID集合正确，时间戳连续更新
四机 / 网络约束	固定轨迹，再改变距离或模型参数	目标包确实经过模型，核对交付与时效



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.1 例程体系与最小接口实验：版本与副作用 环境准备与启动脚本的影响

准备：使用已安装工具链与例程自带环境，确认 PSP_PATH 指向实际安装目录；脚本缺省盘符可能仍为E盘。

版本：本资料核对基于RflySim 5.01安装版；Python38只是目录名。用python --version查版本，动态库还须匹配解释器版本与32/64位。

副作用：SITLRun*.bat 可能提权，并按名称结束 CopterSim、QGC、RflySim3D、python 等进程，影响其他会话。

网络与依赖：保留防护，检查具体应用、UDP端口、组播网卡和局域网范围。NetSim界面依赖 PyQt5、Matplotlib、NetworkX。





9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.1 例程体系与最小接口实验：最小收发操作 两机点对点的启动顺序

```
0.ApiExps/e1.RflyNetAPIExps/  
1.P2PSendData/
```

准备：打开 Readme.pdf，核对载具编号1、2和工具链环境；本例仅验证状态交换，无需起飞。

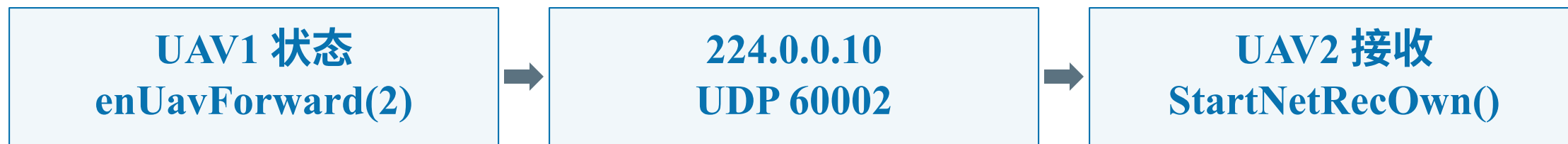
启动：运行 SITLRun2MavlinkFull.bat；等待两个 CopterSim/PX4 实例就绪。

运行：用 Python38Run.bat 分别打开两窗口，先执行 python UAV2Ctrl.py，再执行 python UAV1Ctrl.py。



9.7.1 例程体系与最小接口实验：点对点观察与判断

目标ID、UDP端口与源ID字典



发送目的：2 接收端口：60002 源字典：UavDict['1']
显式等价接收：net.StartNetRec(60002)

预期提示：Got UAV1 Data。核对 CopterID 为1，位置单位为米；本地NED位置与全局地图位置不能互换。

判断：出现目标源状态支持“接口已接通”；一次打印不代表持续包率或时延已达标。



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.1 例程体系与最小接口实验：一对多分发 三机组播的操作与源集合

```
0.ApiExps/e1.RflyNetAPIExps/  
2.BroadSendData/
```

准备与启动：打开 Readme.pdf，运行 SITLRun3MavlinkFull.bat，再运行 UavPythonRunALL.bat。

观察：各窗口每秒打印所收到的载具ID和全局位置；默认发送与接收使用 224.0.0.10:60000。

判断：列出每个接收方的源ID集合，检查包含另两机且状态持续更新。本机回环另记，不能冒充另一节点。





9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.1 例程体系与最小接口实验：接通与持续更新 组播不通时的逐层定位

观察现象	优先检查	复查证据
完全无源ID	CopterSim状态、Python环境、地址与端口、组播成员加入	发送侧状态变化，接收侧源ID出现
只收部分节点	ID重复、源脚本未启动、目标网卡与网络范围	每个接收方的源ID集合
位置不变	飞机静止还是消息停止更新？	时间戳与接收计数是否继续增长
本机通、跨机不通	所需程序/UDP规则、网卡、交换机组播策略	在同样发包条件下逐主机复查





9.7 本章实验案例与综合验证



本章目录

本章实验案例与综合验证

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

9.7.1 例程体系与最小接口实验

教材对应：第9.3.1节，接口学习实验

9.7.2 多机通信与粗粒度仿真

教材对应：第9.3.1节，基本使用与进阶开发

9.7.3 联合仿真与高阶案例

教材对应：第9.3.1-9.3.2节，图9.10

9.7.4 结果解释与综合验证

教材对应：第9.3节，案例综合验证



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：基本使用实验 四机环形案例的准备与入口

1.BasicExps/e1.RflyNetSimExps/
3.PythonNetSimAPI-SimpPack/

准备：打开 Readme.pdf，确认4个实例编号1至4，仿真场景与初始位置一致。

操作：运行 SITLRun4MavlinkFull.bat，待全部3D Fixed后运行 UavPythonRunALL.bat。

运行影响：initOffboard修改仿真保护参数，随后解锁、起飞与跟随。

坐标含义：NED下向坐标-10 m表示参考原点上方10 m。





9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：消息拓扑

环形通信与跟随控制的区别

源机	发送目的端口	接收者如何使用
1	60002, 发给2号	2号跟随1号, 期望北向位置后移1 m
2	60003, 发给3号	3号读取2号状态并跟随
3	60004, 发给4号	4号读取3号状态并跟随
4	60001, 发给1号	1号等待4号就绪后执行预定运动

消息流为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ ；持续跟随链为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ 。



9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：更新事件与控制 降采样和跟随误差的一步计算

接口：enNetForward([60002], '224.0.0.10', 2); Interval=2 表示每3个已处理事件发送一次。

$$f_{\text{send}} \approx \frac{f_{\text{event}}}{I + 1} = \frac{90}{3} = 30 \text{ Hz}$$

假设已处理状态事件为90 Hz；实际发送频率还受事件合并与调度影响。

教学输入：1号北向位置10 m，2号北向位置8.4 m；跟随后移1 m，比例增益为1 / s。

$$v_{2,N} = 1 \text{ s}^{-1}(10 - 1 - 8.4) \text{ m} = 0.6 \text{ m/s}$$

代码在各轴速度绝对值小于0.2 m/s时置零，循环约每0.03 s执行；这是给定状态的计算示例，非实测响应。



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：粗粒度约束实验

NetSim4Demo 的启动顺序

```
2.AdvExps/e1.CoaGraNetSimExps/  
1.NetSim4Demo/
```

准备：打开 Readme.pdf 与 readme.txt；核对 PSP_PATH、4机环境和 PyQt5 / Matplotlib / NetworkX 依赖。

默认操作：SITLRun4MavlinkFull.bat → 全部3D Fixed → PythonRunALL.bat。

分步排错：在例程环境中先 python NetworkSimulation.py，再 UavPythonRunALL.bat，最后 python PyViaGui.py；勿重复启动。





9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：转发数据路径

状态、业务包与界面使用不同端口

来源 → 去向	端口与地址	数据的作用
CopterSim → 网络模型	224.0.0.11:20008	168字节状态包，位置用于距离计算
UAVCtrl → 网络模型	组播 224.0.0.11:30000	业务包，24字节头部含源/目标ID
网络模型 → 接收程序	目标主机 UDP 22000+ID	经概率丢弃/延迟处理的业务包；默认仅打印，未接入运动控制
网络模型 → PyViaGui	224.0.0.11:32000	位置、直接链路质量与逐源统计



9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：教学模型

距离怎样变成链路质量

默认 max_range=0.3 km，可靠区至120 m。令 d 为节点距离 (m)， q 为模型的单链路交付质量。

$$q(d) = \begin{cases} 1, & d \leq 120 \\ 1 - \frac{\log_{10}(d/120)}{\log_{10}(300/120)}, & 120 < d < 300 \\ 0, & d \geq 300 \end{cases}$$

距离 / m	120	180	240	300
质量 q	1.000	0.557	0.244	0.000

以上为确定性教学计算，非实测；模型未含射频标定与完整无线接入竞争。



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：模型一步计算

路径可靠性与计划延迟

教学网络：A到C直连质量0.25；A到B为0.8，B到C为0.7。各边质量仅作为本例模型输入。

$$Q(A \rightarrow B \rightarrow C) = 0.8 \times 0.7 = 0.56 > 0.25$$

$$\tau_{\text{plan}} = \frac{0.001}{Q} \text{ s} = \frac{0.001}{0.56} \text{ s} \approx 1.79 \text{ ms}$$

执行规则：随机数小于路径质量才入队；到期后转发至目标22000+ID。质量为0时丢弃。

该最大乘积模型与教材ETX最小和路径不同，也不等同于OLSR路由协议。



9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：读取模型结果 界面统计的口径与实现边界

实现项	当前规则	解释结果时的边界
丢包计数	按源统计每次目标转发尝试， 并含部分格式错误	广播一条消息可计多次； 未注册目标可能在计数前跳过
时间窗口	约1 s更新和清零统计	不同窗口不能直接相加成 统一的端到端丢包率
带宽门限	data_rate 累加 len(buf)/128； 默认 bandwidth=100.0	是软件门限口径， 不是已标定的无线吞吐能力
延迟队列	按入队顺序检查到期队首	计划延迟不等于实际到包延迟， 后包可能被前包阻挡

9.7.2 多机通信与粗粒度仿真：对照操作 三种距离工况的实验判据

工况	操作与观察	判断
近距离 ≤ 120 m	保持同一业务频率， 记录距离、质量、到包序号	直接质量为1；仍检查队列、 带宽门限和真实接收计数
边缘 120-300 m	按距离分段比较， 记录中继路径与到包间隔	模型直接质量下降； 随机损失需重复种子统计
直接距离 ≥ 300 m	同时查看其他链路和接收端	直接质量为0；存在中继时 路径质量可能仍大于0

固定：轨迹、业务大小、发包频率、控制器、统计区间；每次只改变一个网络因素。



9.7 本章实验案例与综合验证



本章目录

本章实验案例与综合验证

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

9.7.1 例程体系与最小接口实验

教材对应：第9.3.1节，接口学习实验

9.7.2 多机通信与粗粒度仿真

教材对应：第9.3.1节，基本使用与进阶开发

9.7.3 联合仿真与高阶案例

教材对应：第9.3.1-9.3.2节，图9.10

9.7.4 结果解释与综合验证

教材对应：第9.3节，案例综合验证



9.7.3 联合仿真与高阶案例：细粒度网络仿真

NS-3 联合仿真的准备条件

一般入口： 0.ApiExps/e6.NS3DepsTestExps/ 内有 RflyNet.cc、TestSend.py 与 PythonAllUavDemo/。

定制环境： 3.CustExps 下相关案例仅限完整版及以上。现有脚本使用 WSL 发行版 RflySim-20.04 和 ns-3.33 定制源码树。

依赖条件： 核对 gpsr、aodvKmeans、parrot 等自定义模块，编译器、网络接口、实时调度与UDP端口映射。

源码核对： 该入口RflyNet.cc有位置/速度字段互换，先修正映射再验证。编译与联动未实测；普通NS-3发行包不能直接替代定制树。



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.3 联合仿真与高阶案例：条件性选学

定制入口的功能与目录依赖

共同目录：3.CustExps/e2.NS3_UAVCommExps/
仅限完整版及以上版本；各目录入口均为 OneScript.bat。

子目录	目标与观察对象	依赖
1.NS3	基础联动；文档明确飞机不飞	自身 ns-3.33.zip 与 netsim/
2.NS3-Udp-PyQtViz	UDP网络状态与PyQt可视化	复用相邻 1.NS3 源码树
3.NS3-PyViz	NS-3中的PyViz拓扑显示	复用相邻 1.NS3 源码树
4.NS3-Ctrl	网络与控制联动目标	自身源码树与独立压缩包



9.7.3 联合仿真与高阶案例：安装与启动副作用

OneScript 的操作顺序与写入影响

适用：3.CustExps/e2.NS3_UAVCommExps/，仅限完整版及以上；编译与运行未验证。



脚本行为：启动uav仿真，WSL内解压 ns-3.33.zip，将 netsim/RflyNet.cc 复制到 scratch，再 `sudo ./waf configure / build / --run`。

影响：源码覆盖、构建文件写入、提权和多进程启动。网络不通时检查应用与端口规则，保持防护开启。



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.3 联合仿真与高阶案例：准备、操作与判断

联合仿真的分阶段验收

阶段	操作与观察	通过判据
构建与配置	记录源码版本、模块、构建输出	构建退出成功，目标程序存在
最小包转发	用 TestSend.py 或案例uav入口，跟踪源/目标ID和UDP端口	同一序号消息可在目标端对应
运动与网络	输入已知轨迹，核对坐标和单位	运动变化对应到NS-3节点位置
控制与对照	在控制专用案例里切换网络工况	控制输入来自模型出口， 共同窗口统计通信与任务指标



9.7.3 联合仿真与高阶案例：虚实联动案例 真机与虚拟场景的通信联动

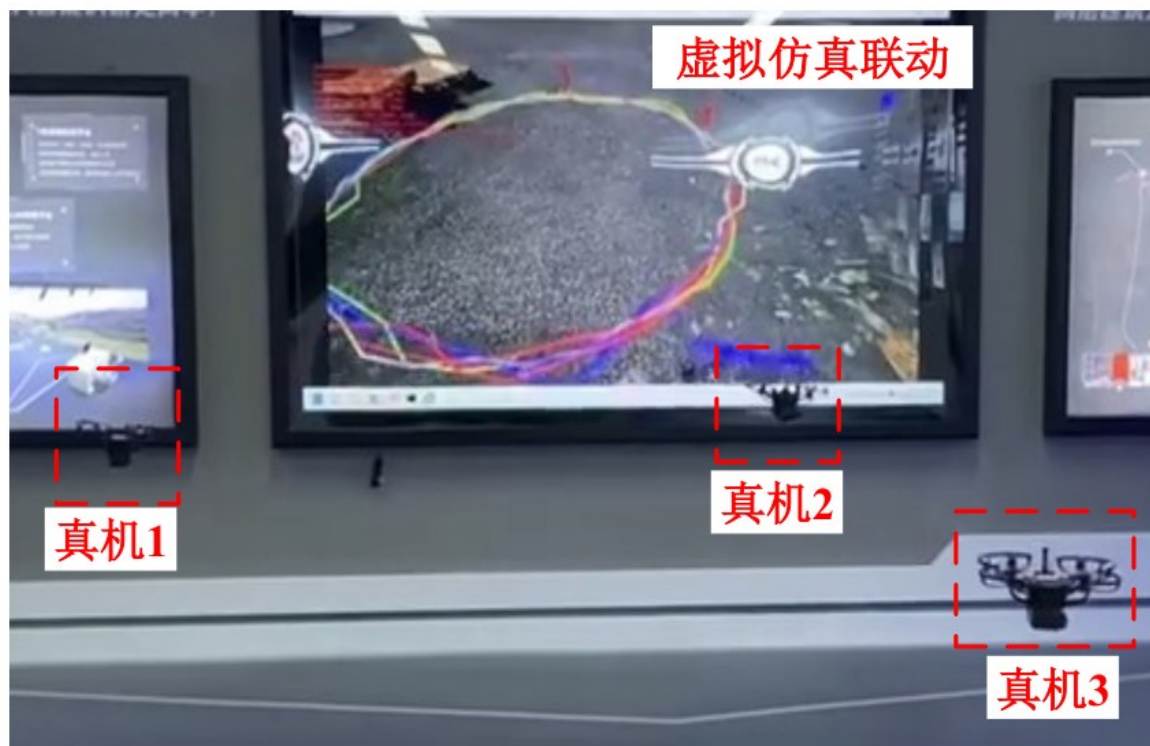


图9.10(a) 虚实联动通信仿真

对象：真机节点经局域网与仿真节点连接，虚拟场景提供任务环境。

机制：节点消息经过网络仿真器中转，再进入控制与显示。

判断：记录哪些消息受网络约束，确认没有理想直连旁路。

9.7.3 联合仿真与高阶案例：数字孪生可视化 三维通信特效承载哪些信息

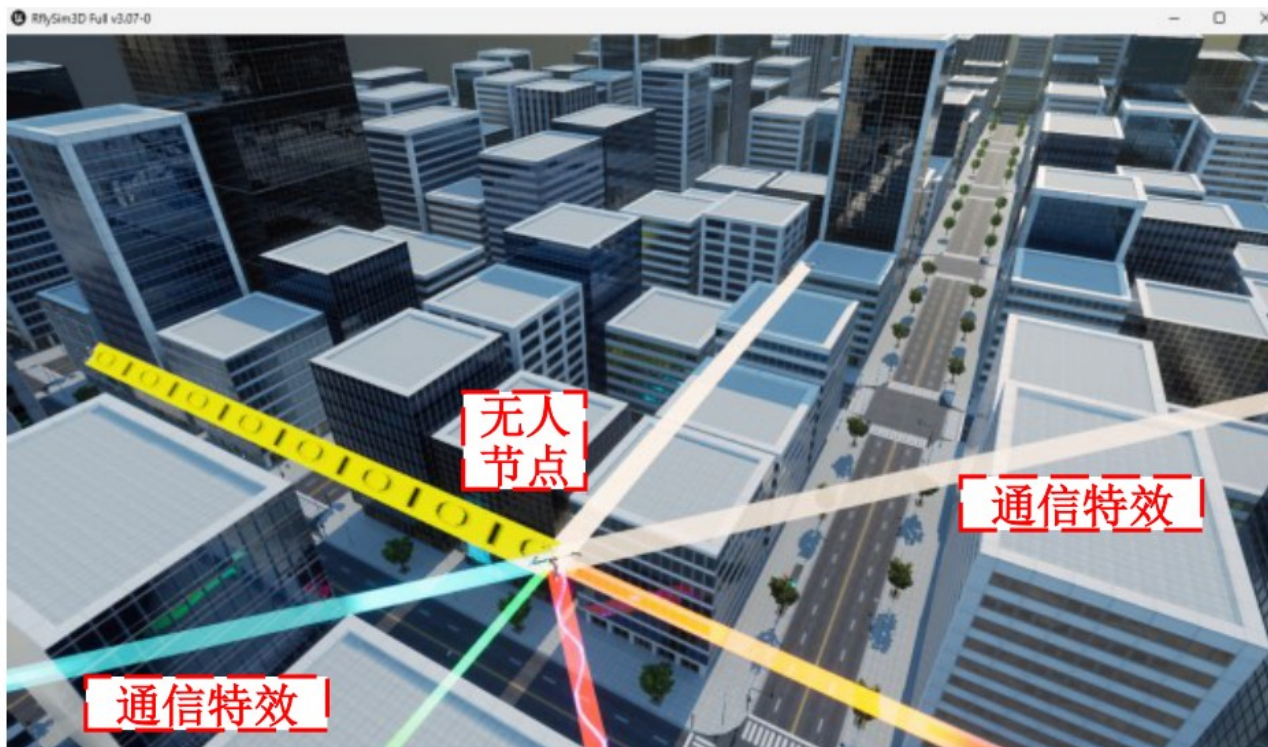


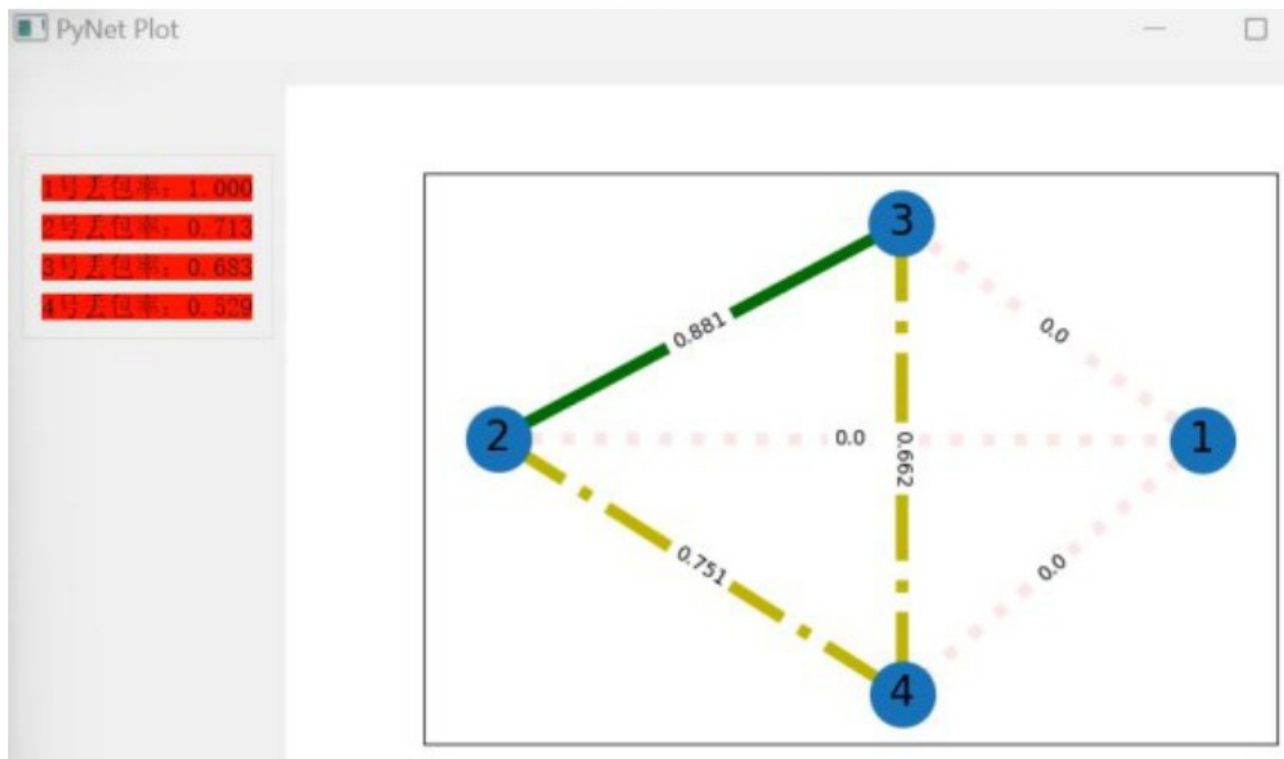
图9.10(b) 数字孪生通信可视化

对象：场景中的无人节点、连线和区域显示通信状态。

机制：UE蓝图接口把连通性、速率、时延或丢包统计映射为特效。

判断：先明确颜色和线型的数据来源，再与同一时刻日志对齐。

9.7.3 联合仿真与高阶案例：粗粒度结果示意 节点位置与直接链路质量



对象：节点位置和节点对之间的连接质量。

对应：距离进入质量映射，质量再影响选路和交付概率。

判断：将某条直接链路与端到端路径区分，按同一时间窗核对。

图9.10(c) Python粗粒度网络仿真

9.7.3 联合仿真与高阶案例：NS-3结果示意

细粒度仿真中的拓扑与分组事件

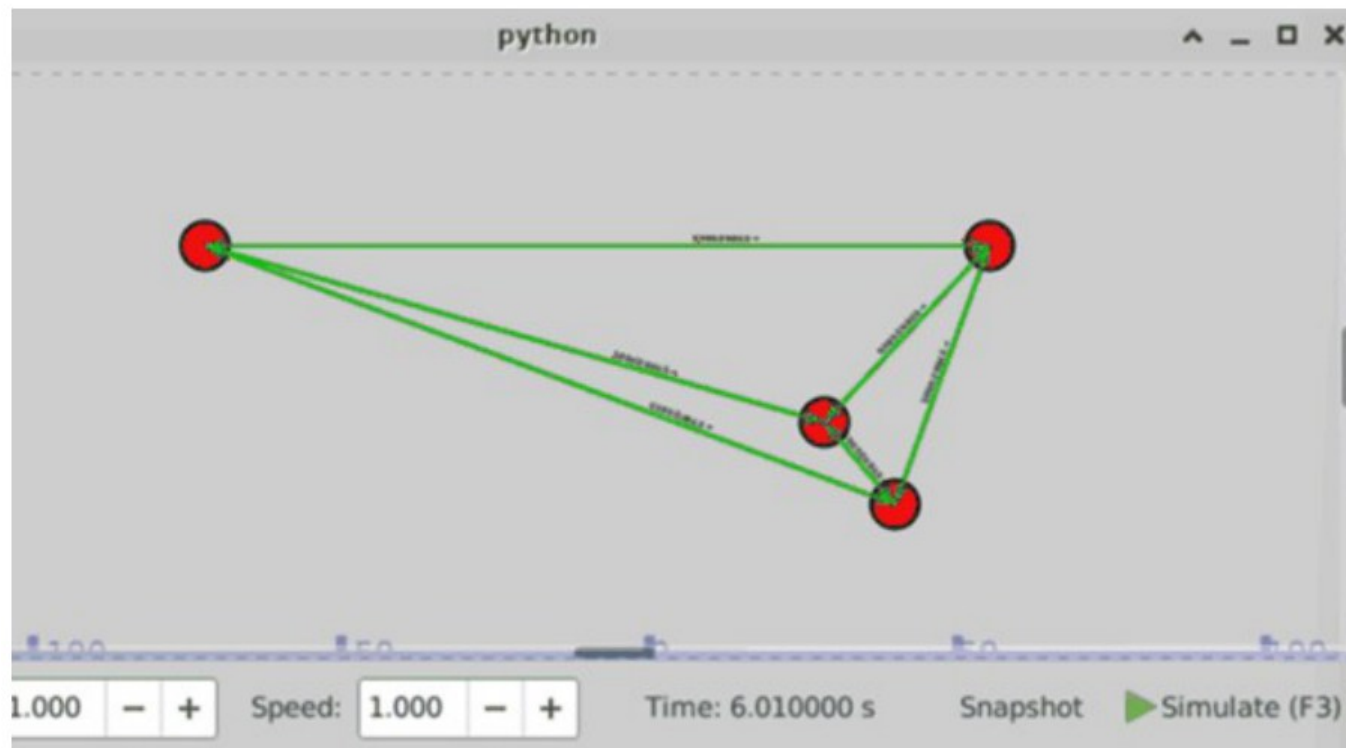


图9.10(d) NS-3细粒度通信仿真

对象：网络节点、连接关系及通信可视化。

机制：设备、信道、应用与路由在离散事件中共同作用。

判断：对应包事件、路由表与接收统计，不能仅凭连线判断时延达标。



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.3 联合仿真与高阶案例：资源分配与中间件 其他方案的选学边界

目录或入口	可以研究什么	条件与边界
0.ApiExps/e2.DDSDeptsTestExps/Demo/HelloWorldExample.py	发布 / 订阅匹配，参数 -p subscriber / -p publisher	先核对DDS与Python绑定版本， 以及动态库的32/64位
0.ApiExps/e4.MQTTDeptsTestExps/ 0.ApiExps/e5.RedisDeptsTestExps/	Broker分发、Pub/Sub 或键值轮询	额外服务与版本需匹配； 不作为默认实验必装项
2.AdvExps/e2.NetResAlloc/main.py	随机策略、环境与界面 之间的交互流程	主入口固定random， 其他算法分支为TODO





9.7 本章实验案例与综合验证



本章目录

本章实验案例与综合验证

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

9.7.1 例程体系与最小接口实验

教材对应：第9.3.1节，接口学习实验

9.7.2 多机通信与粗粒度仿真

教材对应：第9.3.1节，基本使用与进阶开发

9.7.3 联合仿真与高阶案例

教材对应：第9.3.1-9.3.2节，图9.10

9.7.4 结果解释与综合验证

教材对应：第9.3节，案例综合验证



9.7.4 结果解释与综合验证：指标口径

通信指标的定义与统计对象

统计约定：固定源-目标业务流，发送窗口长度 T ；去重、剔除预热，停止发送后等待约定排空时间。

$$P_{\text{loss}} = 1 - \frac{N_{\text{rx,unique}}}{N_{\text{tx}}}$$

N_{tx} ：发送条数； $N_{\text{rx,unique}}$ ：去重后收到的条数。

$$G = \frac{8 \sum L_{\text{payload,rx}}}{T} \quad [\text{bit/s}]$$

$L_{\text{payload,rx}}$ ：每条成功消息的负载字节数； T 以秒计。

时延：每条成功消息的接收时刻减发送时刻，报告中位数、95分位数和最大值，并注明时钟误差。

任务：同步记录跟随误差、失联持续时间和降级次数。通信达标与任务达标分别给出判据。

9.7.4 结果解释与综合验证：教学记录，非实测

六条消息的可复算记录示例

序号	发送 / ms	接收 / ms	时延 / ms
1	0	10	10
2	20	35	15
3	40	65	25
4	60	75	15
5	80	丢失	不计入时延
6	100	140	40

本例生成即发送，使用同一时钟；窗口1 s，每包100 B。6发5收：丢包率16.7%，有效吞吐4,000 bit/s。

成功包均值21 ms、中位数15 ms；最近秩P95取排序后第5项，即40 ms。

9.7.4 结果解释与综合验证：时钟与状态新鲜度

时间戳与信息年龄

$$\hat{d} = t_{\text{rx}}^{(B)} - t_{\text{tx}}^{(A)} = d + \Delta_{BA}$$

d 为真实时延， Δ_{BA} 为接收主机B相对发送主机A的钟差。跨机相减前须统一时间基准。

$$A(t) = t - t_{\text{gen,latest}}; \quad A(100 \text{ ms}) = 100 - 60 = 40 \text{ ms}$$

上页100 ms时，已收状态中生成时刻最新的是序号4（60 ms生成）。若以10 m/s匀速运动，这40 ms内位移为0.4 m。

0.4 m是状态陈旧期间的位移示例，实际跟随误差还取决于预测、反馈和控制器。

9.7.4 结果解释与综合验证：综合验证设计

从理想通路到受限网络的对照

对照阶段	保持一致	增加的机制与归因
理想直连	参考轨迹、初值、业务大小/频率、 控制器、窗口与时钟口径	基线接口和任务表现
粗粒度模型	同一业务流及相同参考轨迹	距离质量、概率损失、计划延迟 和软件门限对结果的影响
NS-3细粒度模型	同一节点身份与业务输入	设备、信道、接入与路由事件 解释排队和交付差异

输出：参数表、逐包日志、实际轨迹与任务误差；记录工况和重复次数。



9.7 本章实验案例与综合验证



9.7.4 结果解释与综合验证：失败定位与回退 结束实验与保留可追溯记录

记录：保存版本、脚本SHA、参数、轨迹、随机种子、统计窗口、时钟基准，以及每条流的发送/接收序号。

结束：在各实验窗口先 Ctrl+C 停控制和发送，再停网络模型与界面，最后关闭本次仿真器。

阻塞处理：endNetLoop() 存在等待接收线程的风险；正常退出流程未实测。必要时按窗口与PID只结束本次进程。

恢复：停止后确认端口释放，保留失败日志；重试前恢复实验副本参数，不用全局终止python作为常规退出。



9.7 本章实验案例与综合验证



练习与讨论

课堂讨论：结果能够支持什么结论

问题1：直接链路质量为0，目标仍收到包。怎样区分有效中继、旧缓存与绕过模型的通路？

问题2：方案甲平均时延15 ms、丢包30%；方案乙25 ms、丢包1%。能否只凭平均时延选甲？

问题3：跨机时间戳相减得到负时延，应先改网络模型，还是检查时钟、单位和消息身份？





9.7 本章实验案例与综合验证



参考要点

讨论参考：沿同一业务流寻找证据

问题	参考判断	需要的证据
1 直接断链仍到包	中继可能有效，也可能是旧样本或理想通路绕过模型	同序号新包、路径质量、模型出口与目标到包日志
2 低平均时延	更高丢包可能只留下快速样本；按业务目标综合评价	去重丢包率、P95、信息年龄、跟随误差与失联时长
3 负时延	优先定位时钟和数据配对	单位、时钟偏差界、源/目标ID与消息序号





9.7 本章实验案例与综合验证



本节小结

本节小结：从接通到有边界的验证

方法：沿默认四阶段路线逐步增加约束，保留消息身份和可复算的数据记录。

判断：通信指标解释数据交付，任务指标解释使用这些数据后的控制效果；结论绑定版本、工况与窗口。

易错点：ID不是UDP端口；组播不是全互联控制；模型质量和界面颜色不是实测链路性能。

衔接：课件9.8复算链路与路由，并用明确的容量、时延和失效条件设计综合验证方案。

