智能无人系统控制实践

第九章 多机通信与智能组网

作者：戴训华 中南大学

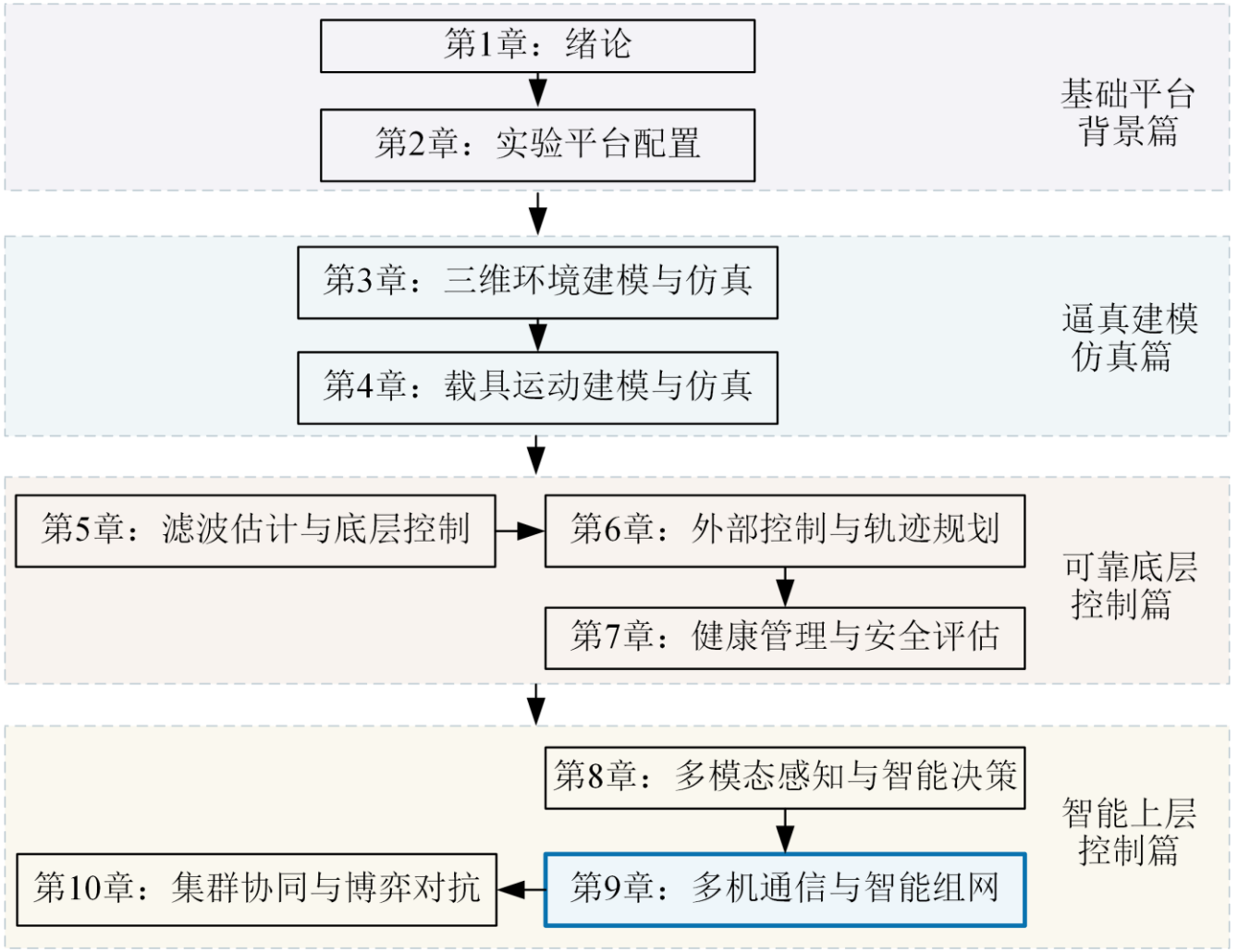
主页：https://faculty.csu.edu.cn/daixunhua

邮箱：dai.xh@csu.edu.cn

平台：https://rflysim.com

配套教材





教材：戴训华，全权，任雪峰. 智能无人系统控制实践[M]. 北京：电子工业出版社，2026.

本章学习目标

学完第九章能够完成什么

1. 说明任务需要交换哪些数据及其时效要求
2. 根据通信负载、距离和环境选择硬件与协议
3. 计算链路损耗与路由代价，解释模型的适用条件
4. 沿RflySim数据通路设计并评价多机通信实验

本章目录

组网通信基础与背景需求

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

9.1.1 组网通信的概念与作用

教材对应：第9.1.1.1节

9.1.2 组网通信典型应用场景

教材对应：第9.1.1.2节

9.1.3 通信与集群协同的技术关联

教材对应：第9.1.2节

9.1.4 问题优化与发展方向

教材对应：第9.1.1.3–9.1.1.5节

9.1.1 组网通信的概念与作用：协同任务

单机能够感知，多机还要共享任务信息

甲：发现目标 → 消息：位置与时间 → 乙：复核目标

可共享的信息：目标位置、观测时刻、坐标系以及可信程度。

需要协调的任务：谁负责复核，谁继续巡检，目标更新后怎样调整行动。

单机能力决定能做什么，信息共享扩大了可协同的范围。

9.1.1 组网通信的概念与作用：基本概念

节点、链路与网络怎样构成通信系统

概念	含义	巡检中的例子
节点	参与收发或转发信息的实体	载具、地面站、中继节点
链路	相邻节点之间的通信连接	甲与乙之间的无线连接
网络	组织节点与链路以实现数据交换	甲经中继把状态传给丙
组网通信	建立并维护多节点信息交换关系	节点发现与路径维护

有线、无线或混合连接均可组网；实际选择取决于运动范围与部署环境。

9.1.1 组网通信的概念与作用：层次功能

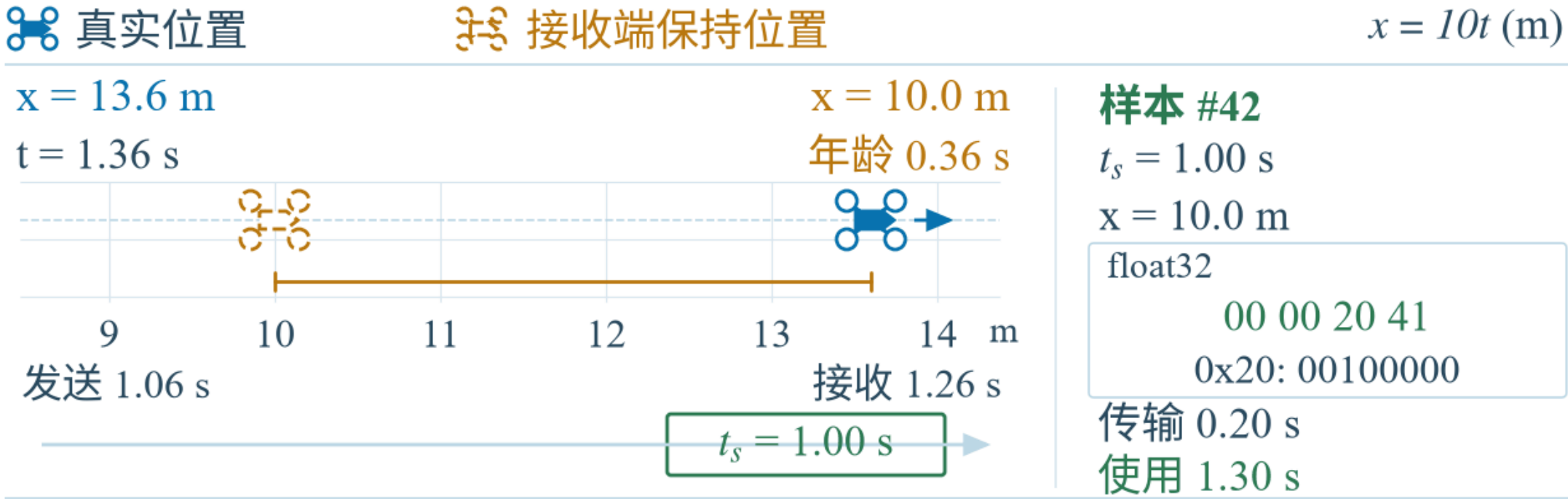
四类信息承担不同的协同任务

信息类别	典型内容	关注的问题
环境感知	图像、点云、目标位置	是否需要原始数据，坐标是否统一
状态与意图	位置、速度、计划路径	位置取最新值；计划核对版本与冲突
任务与指令	目标点、任务分配、确认	按任务ID区分接收、执行中与完成
健康与异常	心跳、链路质量、故障报告	是节点异常，还是链路暂时中断

心跳是周期性的在线通报，收到心跳不代表位置样本足够新。

9.1.1 组网通信的概念与作用：消息传递过程

一条状态消息从采样走到接收端



使用采样时的位置，时间戳仍是 1.00 s

图：消息携带采样时的位置与时间戳；到达时，载具已继续前进

9.1.1 组网通信的概念与作用：消息约定

接收端需要知道数值属于谁、何时产生

字段	例子	用途
发送者 / 类型	节点2 / 位置状态	知道谁发送、怎样解析
序号 / 采样时间	105 / 12.400 s	识别乱序与重复，判断样本有效性
坐标 / 单位	北东地坐标 / m	避免方向、原点与单位混用
状态值	位置（m）、速度（m/s）	为邻居估计与协同计算提供输入

时间戳需统一时间基准；北东地坐标还需约定共同原点。

9.1.1 组网通信的概念与作用：通信与任务

共享信息与形成协同是两个层次

通信连接	共同的信息约定	协同决策
消息能否到达目标节点	含义与时刻是否一致	怎样分工并响应变化

星形、网状、分簇描述连接结构；集中式、分布式描述计算与决策分工。

连通为协同提供条件，任务规则决定怎样利用这些信息。

本章目录

组网通信基础与背景需求

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

9.1.1 组网通信的概念与作用

教材对应：第9.1.1.1节

9.1.2 组网通信典型应用场景

教材对应：第9.1.1.2节

9.1.3 通信与集群协同的技术关联

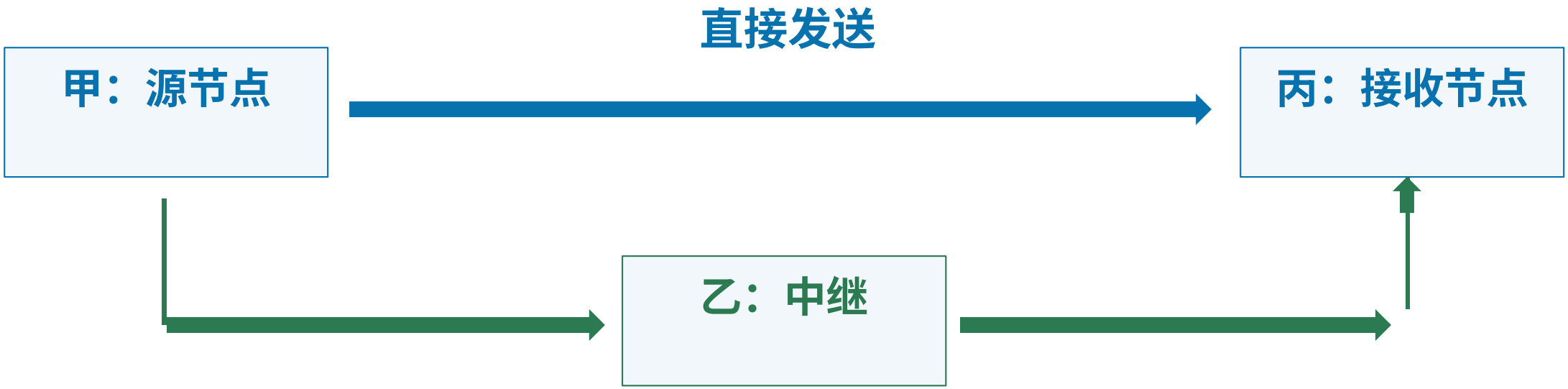
教材对应：第9.1.2节

9.1.4 问题优化与发展方向

教材对应：第9.1.1.3–9.1.1.5节

9.1.2 组网通信典型应用场景：小规模路径

三个节点就会遇到直连与中继的取舍



甲经乙向丙转发；若乙—丙断连，旧路径便失效。
只有甲—丙仍可达时才能改为直连，否则要另寻路径或等待恢复。
中继增加转发开销，也可能换来更好的单跳链路。

9.1.2 组网通信典型应用场景：小规模优化目标

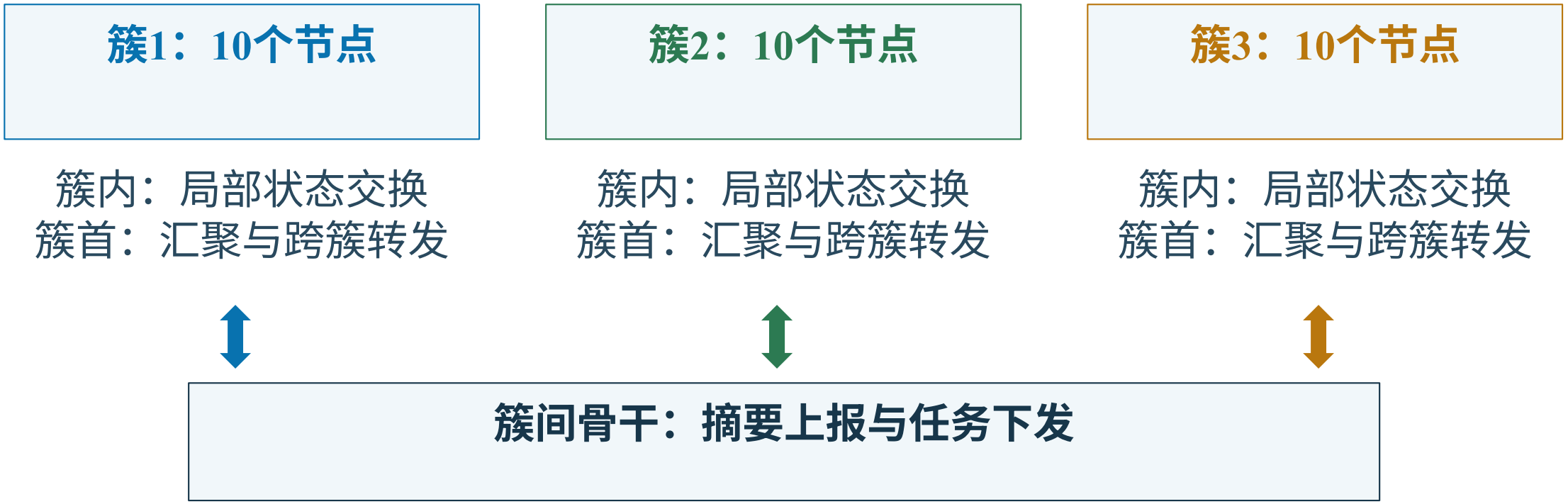
低时延、低能耗与负载均衡可能相互牵制

优化目标	可观察量	可能付出的代价
响应及时	端到端时延与超时比例	更频繁更新占用链路
降低通信能耗	发送、接收与重传能量	增加跳数或等待时间
分担负载	各节点转发包率、队列长度	改走替代路径可能更慢

例：直连排队5 ms、发送10 ms，共15 ms；
两跳各需排队2 ms、发送4 ms，共12 ms（本例忽略其他时间）。

9.1.2 组网通信典型应用场景：大规模组织

分簇把局部交换与跨区域转发分开



示例规模：3簇 × 10节点；分簇收益取决于业务与拓扑。

9.1.2 组网通信典型应用场景：簇首管理

簇首轮换分担负荷，也带来重构成本

办法	工作怎样变化	需要考虑
簇首轮换	其他节点接替汇聚和转发	重构需选举与迁移状态； 电量高也可能负载重
副簇首 / 多级分簇	分担工作或接替失效节点	新增节点间协调开销
调整成员 / 数据摘要	改变流量分配、减少发送量	拓扑变化与信息损失

低能耗自适应分簇层次（LEACH）按概率轮换簇首。
混合节能分布式分簇（HEED）依据剩余能量与通信代价选簇首。
粒子群优化（PSO）可搜索分簇方案，评价量包括能耗、距离与负载。

9.1.2 组网通信典型应用场景：拓扑与架构

连接结构与控制分工可以组合设计

连接方式	消息路径	可能的计算分工
星形	节点经中心交换信息	中心规划，或中心仅转发
网状	链路变化后更新多跳路径	各节点计算，或集中任务规划
分簇	簇内交换，簇间由骨干连接	簇内自治与上层协调组合

分析系统时分别画“信息经过谁”和“决策由谁计算”。

本章目录

组网通信基础与背景需求

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

9.1.1 组网通信的概念与作用

教材对应：第9.1.1.1节

9.1.2 组网通信典型应用场景

教材对应：第9.1.1.2节

9.1.3 通信与集群协同的技术关联

教材对应：第9.1.2节

9.1.4 问题优化与发展方向

教材对应：第9.1.1.3–9.1.1.5节

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：时效

更新间隔与网络时延在时间轴上不同

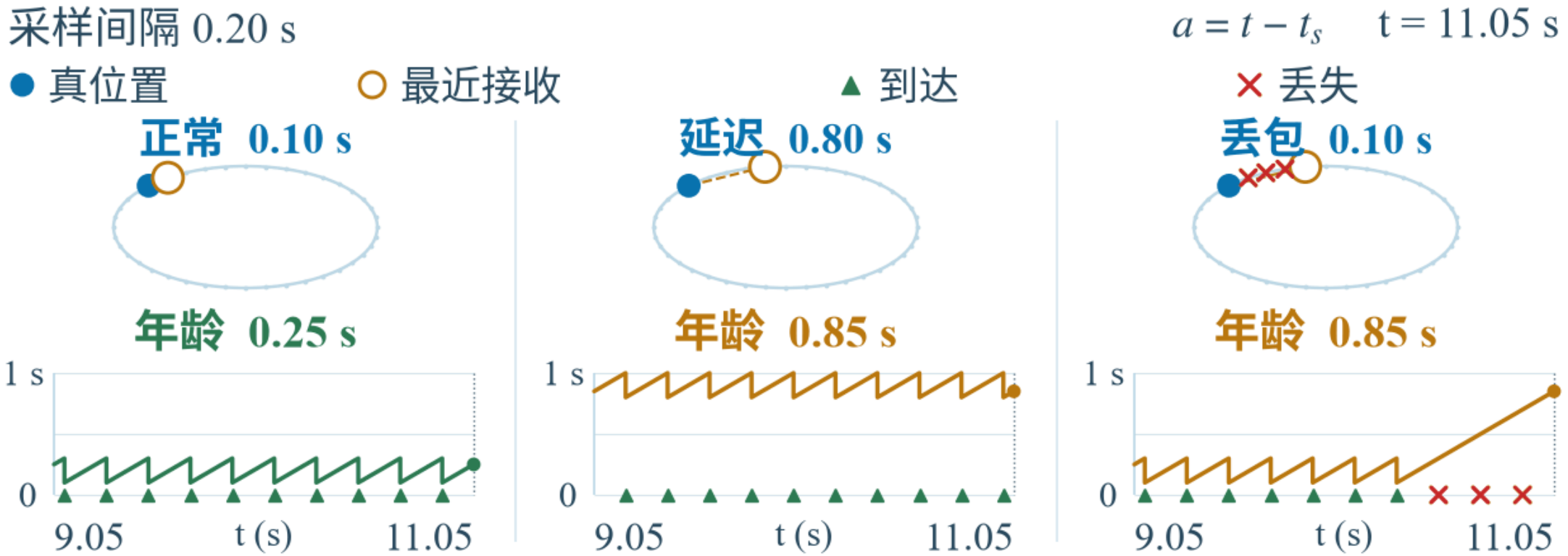
事件	时刻	相邻事件的含义
采样并发出样本 t_{sample}	100 ms	与前一样本相隔100 ms
接收样本	140 ms	本次传送时延40 ms
控制程序使用 t_{use}	150 ms	样本年龄50 ms，接收后驻留10 ms

$$\Delta_{\text{age}} = t_{\text{use}} - t_{\text{sample}} = 150 - 100 = 50\,\text{ms}$$

Δ_{age}为样本年龄；同一时间基准，采样后立即发送。

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：延迟与丢包

同一条轨迹，接收端看到的信息会不同



图：等待时数据年龄增长；新样本到达后，年龄下降但通常不为零

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：状态预测

旧位置与短时预测：算一步，再看边界

一维运动：采样位置 $x(t_s) = 20\,\mathrm{m}$，采样速度 $v(t_s) = 10\ \mathrm{m/s}$。
t_s为采样时刻，t为使用时刻，$\Delta t = t - t_s = 0.2\,\mathrm{s}$为样本年龄。

$$\hat{x}(t) = x(t_s) + v(t_s)\Delta t = 20 + 10 \times 0.2 = 22\,\mathrm{m}$$

匀速时：$\hat{x}(t)$为预测位置，Δx_{hold}为保持旧位置的偏差。

$$\Delta x_{\mathrm{hold}} = v\Delta t = 2\,\mathrm{m}$$

若有未知恒定加速度 $a = 2\ \mathrm{m/s^2}$，预测残差 $e = x(t) - \hat{x}(t)$：

$$e = \frac{1}{2}a(\Delta t)^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 0.2^2 = 0.04\,\mathrm{m}$$

类比：速度30 m/s、样本陈旧1 s时，匀速位移为30 m；不等同于实际控制误差。

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：数据量预算

节点数、消息大小与频率共同决定负载

节点数 $N = 4$，每节点发布频率 $f = 50\,\text{Hz}$，有效载荷长度 $L = 100\,\text{B}$；$1\,\text{B} = 8\,\text{bit}$。

$$R = NfL \times 8 = 4 \times 50 \times 100 \times 8 = 160\,\text{kbit/s}$$

R为全网有效载荷发送速率；本例4节点可单跳互达。

发送方式	有效载荷发送量	额外工作
每样本广播一次	160 kbit/s	接收者共享同一次发送
对3个邻居分别单播	480 kbit/s	发送端复制消息，逐一交付

上述仅计有效载荷；链路预算还需计入包头、接入竞争和重传。

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：完整计算例

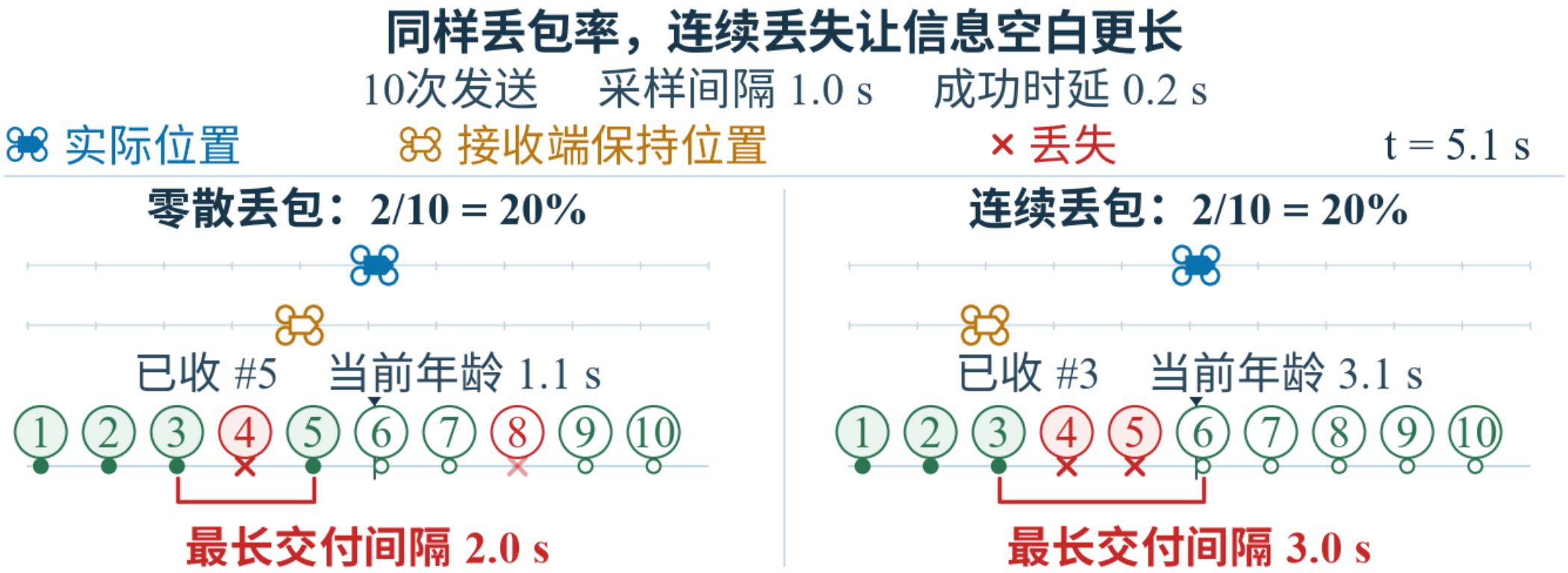
连续接收记录揭示丢包与信息陈旧

控制使用时刻	最新样本采样时刻	样本年龄	保持位置
50 ms	0 ms	50 ms	0 m
150 ms	100 ms	50 ms	1 m
250 ms	100 ms	150 ms	1 m
350 ms	300 ms	50 ms	3 m

初始位置0 m、速度10 m/s；在0、100、200、300 ms采样发送。
到达时刻依次为40、140、丢失、340 ms；四发三收，第三次使用旧样本。

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：丢包分布

丢包率相同，连续丢失仍会拉长信息空白



图：相同发送次数与丢包数，接收端等待新信息的最长时间仍可不同

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：通信与控制协同

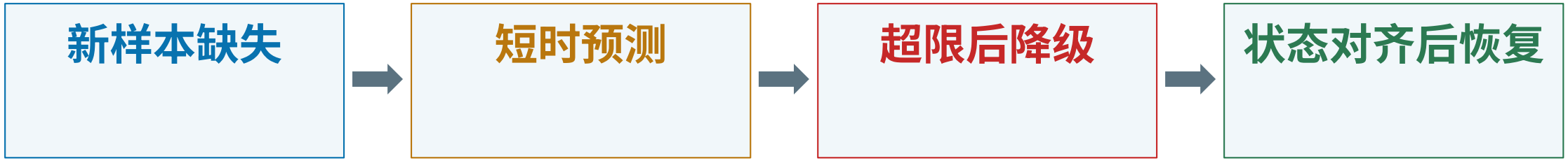
把有限通信资源分给更有用的信息

调节位置	具体做法	工程取舍
消息内容	发送关键状态或目标摘要	降低负载，也可能损失信息
更新时机	周期发送，或按事件触发（如状态变化超过阈值）	平均流量、突发与时效的取舍
资源分配	优先级、路径、重传次数	优先级提高，其他流可能等待

通信优化的目标，是把有用的信息及时送到需要它的节点。

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：故障与鲁棒性

通信中断后的预测、降级与恢复



通信侧：尝试替代链路、重构路径，减少继续断连的时间。

节点侧：信息年龄或预测误差超出任务阈值后，停止依赖远端动作，保持安全间隔。

短时预测有边界，链路恢复后仍需重新核对任务状态。

9.1.3 通信与集群协同的技术关联：通信受限下的协同

近距离感知可以补充无线信息

信息来源	能提供什么	适用边界
最近样本与运动预测	短时间内的邻居状态估计	机动越强、时间越长，误差越大
视觉 / 点云 / 声学	局部相对位置与运动	可见性、量程、遮挡和噪声
约定灯光、声音或动作	少量任务状态或意图	编码约定、辨识与互相观测条件

全局同步可能中断，局部感知仍可支撑有限范围内的协作与避碰。

本章目录

组网通信基础与背景需求

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

9.1.1 组网通信的概念与作用

教材对应：第9.1.1.1节

9.1.2 组网通信典型应用场景

教材对应：第9.1.1.2节

9.1.3 通信与集群协同的技术关联

教材对应：第9.1.2节

9.1.4 问题优化与发展方向

教材对应：第9.1.1.3–9.1.1.5节

9.1.4 问题优化与发展方向：主要问题与优化

组网设计面对五类持续变化的约束

问题	可采用的机制	验证指标
拓扑变化	邻居发现、路径重构	发现与恢复耗时
资源有限	摘要、调度、轻量化	有效吞吐、队列、能耗
丢包与时延	重传、冗余、时效判定	交付率、时延分布、信息年龄
伪造与篡改	认证、完整性与访问控制	异常消息能否被识别和拒绝
遮挡与干扰	替代链路、抗干扰、降级	可达性与任务完成情况

9.1.4 问题优化与发展方向：优化方向

冗余提高可用机会，也占用更多资源

多路径与链路冗余：提高替代路径可用机会，同时增加维护与发送开销。

跨层轻量化：减少重复处理，并让应用时效参与调度；接口耦合也更强。

抗干扰与能效：改变频率、编码或功率配置，收益取决于干扰和链路条件。

额外资源应换来可测的任务收益，而不只是更多通信动作。

9.1.4 问题优化与发展方向：安全与隐私

检错、身份认证与保密分别解决什么

目标	问题	典型机制
传输检错	随机错误是否改变了数据	校验码，例如循环冗余校验（CRC）
来源与完整性	是否可信，是否被篡改	消息认证、身份与权限管理
保密与防重放	是否泄露，旧消息是否被重复利用	加密、计数器或时间约束

安保性保护数据和身份，安全性还要结合控制策略与任务风险。

9.1.4 问题优化与发展方向：多域协同架构

空天海地网络连接不同覆盖范围

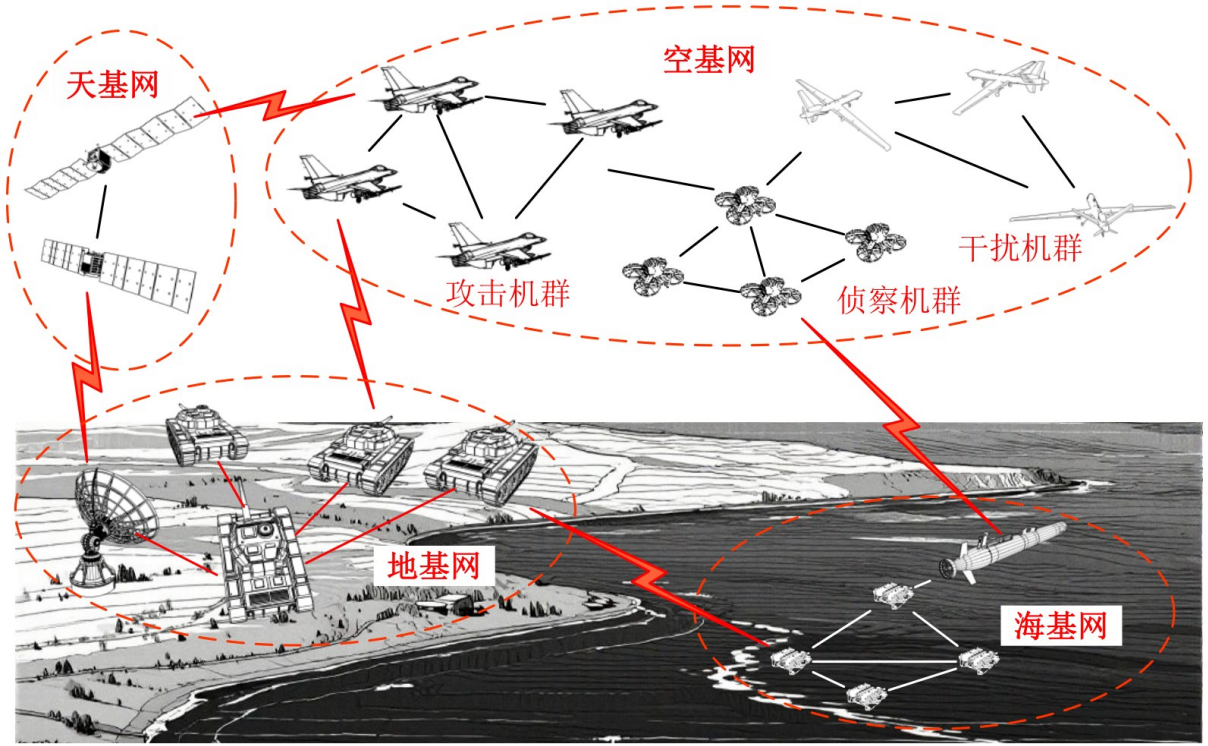


图9.1 空天海地一体化通信网络系统构想

天与空：广域覆盖与机动中继。

地与海：地面任务、海面和水下节点。

跨域关键：不同链路间的接口、时效与资源协调。

9.1.4 问题优化与发展方向：关键支撑技术

跨域协同要适配不同的时延与带宽

支撑技术	具体作用	对任务的影响
异构链路融合	网关连接不同介质与协议	扩大覆盖，增加转换与管理
路由与资源调度	按时效选择路径和资源	关键消息与大数据分开处理
统一数据约定	统一身份、时间、坐标与消息语义	跨平台后仍能解释同一状态

$$t = \frac{d}{c} = \frac{10^7}{3 \times 10^8} \approx 0.033\,\mathrm{s} = 33\,\mathrm{ms}$$

单程路径 $d = 10^7$ m
真空光速 $c \approx 3 \times 10^8$ m/s
t仅表示传播时延。

9.1.4 问题优化与发展方向：RflySim仿真与验证

仿真把通信变化接回多机任务表现



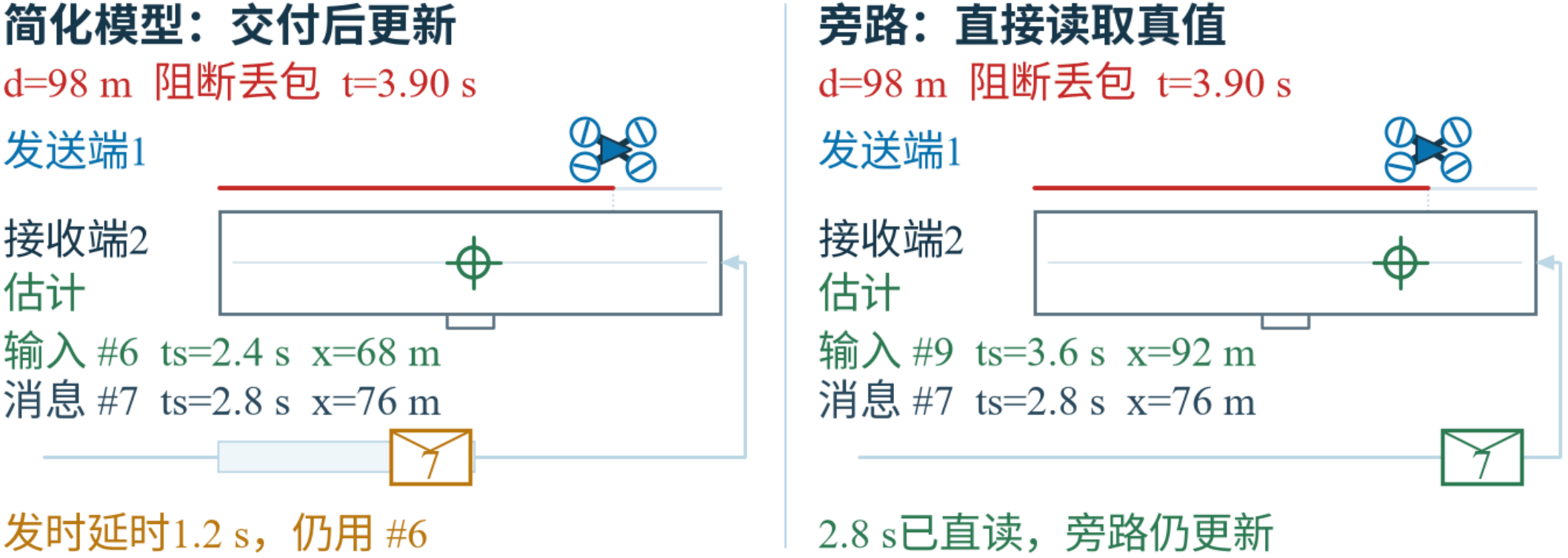
对照实验：固定任务、初始状态、参考轨迹与消息设置，仅改变一种网络条件。

观察与评价：同时记录时延、丢包、可达性、吞吐与任务误差或完成时间。

软件仿真形成可重复基线，半实物和真机继续检验模型之外的影响。

9.1.4 问题优化与发展方向：仿真中的消息交付

网络条件要通过消息交付，才能影响算法输入



图：对比经过通信模型的交付与直接读取真值，核对算法实际使用的信息

练习与讨论

讨论：信息更全，为什么未必协同更好

问题一：全图高频共享与按需目标摘要，各自在哪类任务中更合适?

问题二：心跳正常，但位置1 s未更新，应先查什么?
丢包总数相同，连续丢包和零散丢包的风险是否相同?

计算：4节点各以50 Hz向其余3节点单播100 B有效载荷，求全网发送速率。

答题线索：先说明任务需要的信息，再看时效、数据量和失联策略。

参考要点

参考要点：以任务需求解释通信选择

选择信息：原图保留细节，摘要减少数据量；按任务决定需要哪些字段。

检查新鲜度：核对采样时间、序号和坐标约定，区分活跃链路与陈旧状态。

风险判断：连续丢包可能拉长信息空白；检查可达性、最长断连与任务阈值，再决定预测、降级或重构路径。

$$R = 4 \times 50 \times 100 \times 8 \times 3 = 480\,\mathrm{kbit/s}$$

仅计有效载荷；包头、确认与重传等开销另计。

本节小结

通信需求是硬件与协议设计的起点

概念：节点和链路组成通信网络；协同算法利用网络交付的信息。

方法：按任务确定数据内容、更新频率、可接受年龄和失联策略。

易错点：更新间隔不等于传送时延；拓扑形状不直接决定计算分工。

先写清任务的通信需求，设备参数才有比较的依据。