本章目录

通信建模与干扰仿真

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

9.4.1 信道特性

教材对应：第9.1.5.1节

9.4.2 通信衰减建模

教材对应：第9.1.5.2节

9.4.3 通信损耗模型

教材对应：第9.1.5.3节

9.4.4 网络仿真方法与NS-3

教材对应：第9.1.5.4至9.1.5.5节

9.4.1 信道特性：信道与任务

同一条无线链路会经历哪些变化

信道：发送端与接收端之间传递信号的媒介和传播路径。有线信道经电缆或光纤，无线信道随位置、环境和其他发射活动而变化。



贯穿任务：2.4 GHz链路逐渐拉远，检查接收功率是否达到门限，再判断还需要怎样的网络模型。

信道模型输出接收功率、时延或信道响应；分组交付还取决于调制编码、接入、重传与队列。

9.4.1 信道特性：传播路径总览

一份信号可以沿多条路径抵达接收端

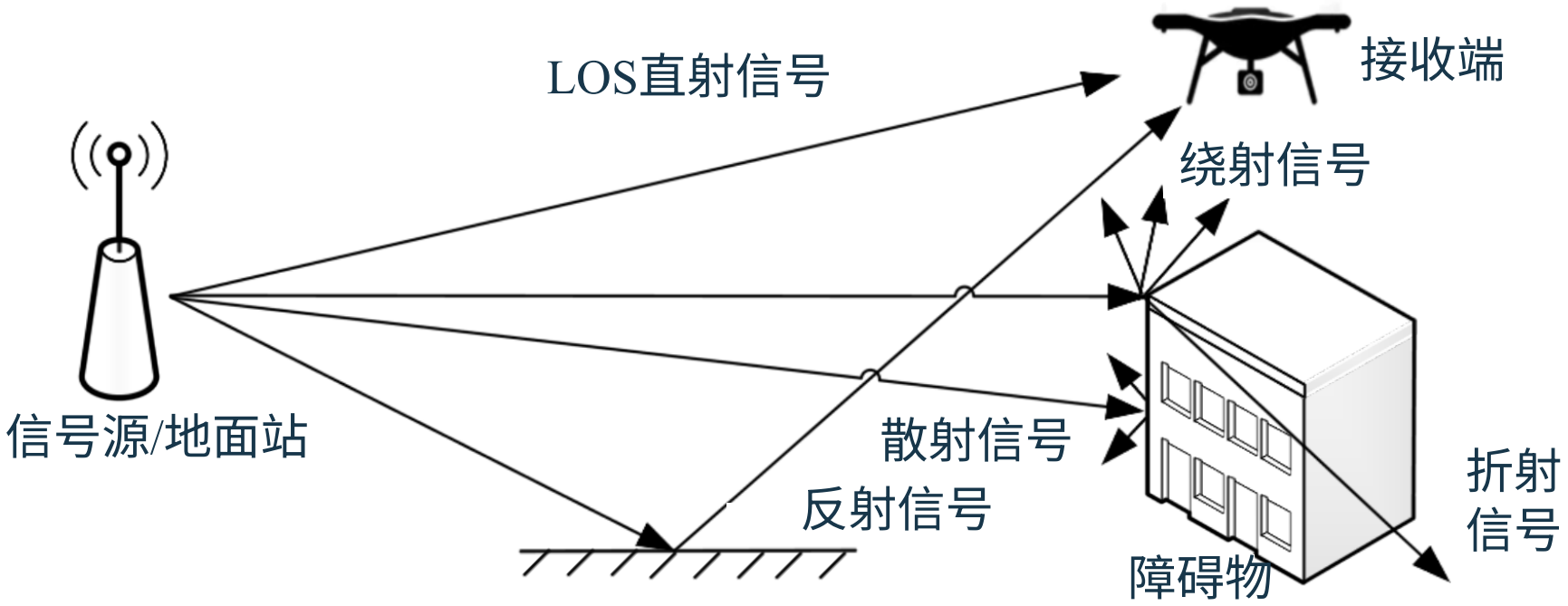


图9.5 无线信道传播特性示意图

视距（LOS）是存在直接路径；非视距（NLOS）没有可用的直接视线路径。

9.4.1 信道特性：反射、折射与绕射

障碍物改变传播方向与能量分布

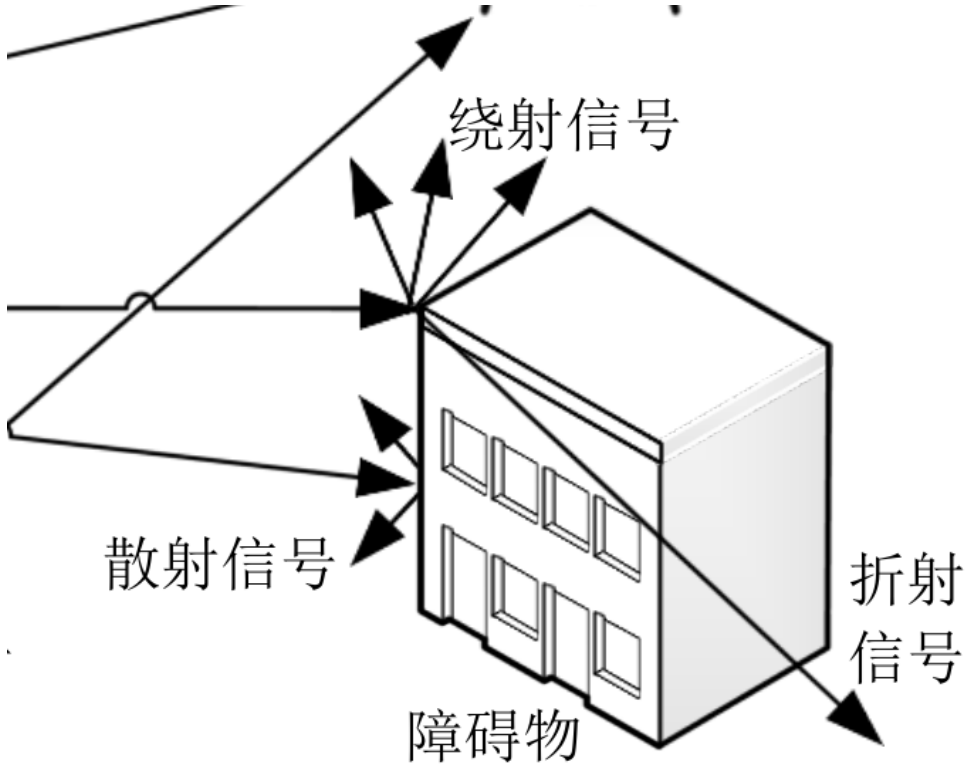


图9.5（局部）障碍物附近的传播

反射与折射：界面使传播返回或偏折；材质和入射角影响强度。

绕射：边缘使信号进入几何阴影区；效果与波长和障碍尺度有关。

散射与吸收：不均匀结构改变能量方向，介质吸收使能量减少。

9.4.1 信道特性：现象与观测

功率降低、相位波动与排队应分别建模

现象	主要变化	模型输入与可观察结果
路径损耗/阴影	平均功率下降或缓慢变化	距离、频率、障碍；观察接收功率。
多径衰落	相位和时延叠加	路径长度、反射；观察功率/时延分布。
外部或同频干扰	有用信号外的能量增加	同时发射活动；观察信干噪比。
网络拥塞	到达速率超过服务能力	业务负载、队列；观察等待和丢包。

$$t_{\text{prop}} = d/c = 1000/(3 \times 10^8) = 3.33\ \mu s$$

t_{prop}为传播时延(s)，d为距离(m)，c为光速(m/s)；尚未计入等待与处理。

本章目录

通信建模与干扰仿真

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

9.4.1 信道特性

教材对应：第9.1.5.1节

9.4.2 通信衰减建模

教材对应：第9.1.5.2节

9.4.3 通信损耗模型

教材对应：第9.1.5.3节

9.4.4 网络仿真方法与NS-3

教材对应：第9.1.5.4至9.1.5.5节

9.4.2 通信衰减建模：式9.1与式9.2

自由空间损耗随距离和频率增加

$$L_{\mathrm{fs}} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(4\pi/c) \tag{9.1}$$

L_{fs}：损耗，dB；d：距离，m；f：频率，Hz；$c \approx 3\times10^{8}$ m/s：光速。式中各数值按指定单位代入。

$$L_{\mathrm{fs}} = 32.44 + 20\log_{10}(d_{\mathrm{km}}) + 20\log_{10}(f_{\mathrm{MHz}}) \tag{9.2}$$

d_{km}按km代入；f_{MHz}按MHz代入。32.44为教材取整常数，适合工程复算。

条件：天线远场、无遮挡的均匀传播介质；显著地面反射、多径与天气损耗另建模型。

9.4.2 通信衰减建模：自由空间算例

1 km、2.4 GHz的自由空间损耗约100.04 dB

$$d_{\mathrm{km}} = 1, \quad f_{\mathrm{MHz}} = 2400$$

$$L_{\mathrm{fs}} = 32.44 + 0 + 67.604 = 100.044\ \mathrm{dB}$$

比较条件	损耗	相对1 km、2.4 GHz
0.5 km，2.4 GHz	94.02 dB	距离减半，减少6.02 dB。
2 km，2.4 GHz	106.06 dB	距离加倍，增加6.02 dB。
1 km，4.8 GHz	106.06 dB	频率加倍，增加6.02 dB。

单位自查：将1000误代入千米公式会得到160.04 dB，错误增加60 dB。

9.4.2 通信衰减建模：接收功率与裕度

链路裕度把传播损耗连接到接收门限

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_c - L_{\text{total}}$$

P_t, P_r：发射/接收功率，dBm；G_t, G_r：天线增益，dBi；L_c：总馈线损耗，dB；L_{total}：传播损耗，dB。

$$P_r = 20 + 2 + 2 - 2 - 100.04 = -78.04\ \text{dBm}$$

$$M = P_r - S = -78.04 - (-85) = 6.96\ \text{dB}$$

$S = -85$ dBm 为本例指定接收模式的门限； M 为功率裕度。总附加损耗若超过6.96 dB，本例就低于门限。门限判据未模拟误包、重传或排队。

9.4.2 通信衰减建模：菲涅尔区域

视线无遮挡仍需检查周围的菲涅尔区

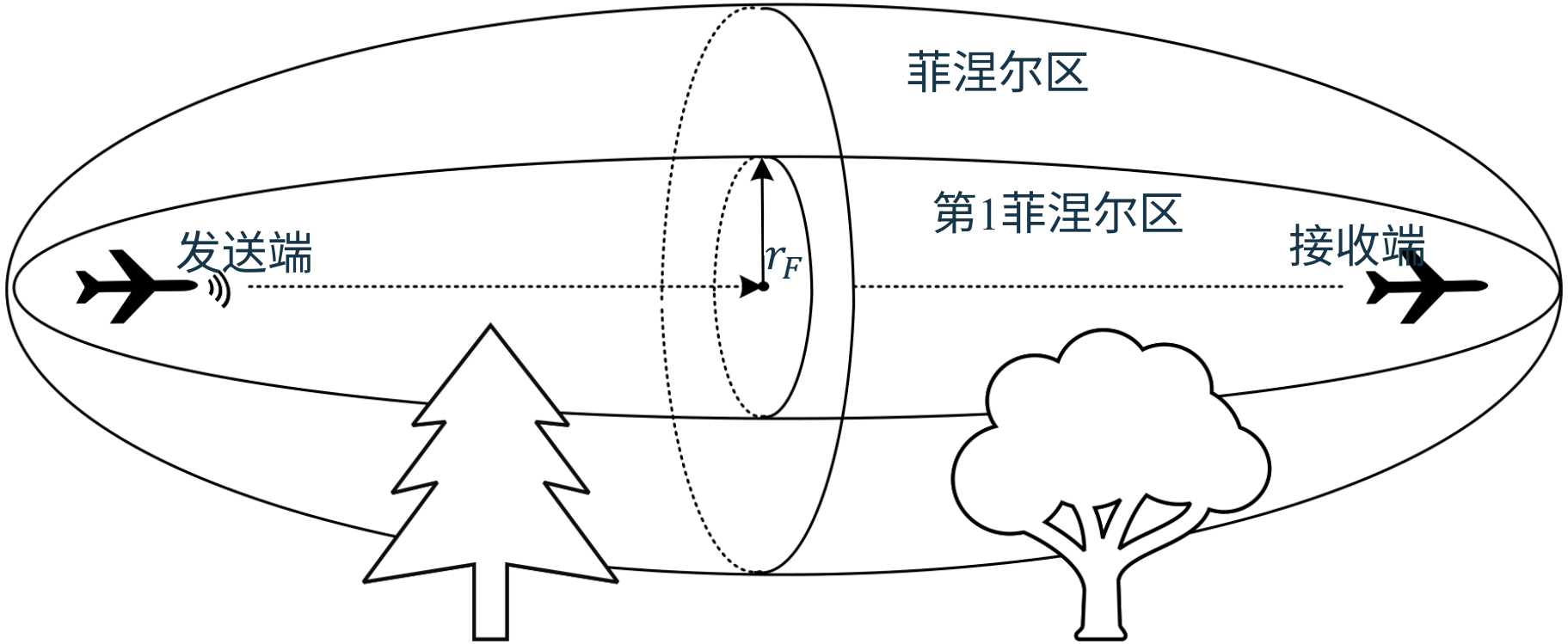


图9.6 无线通信中的菲涅尔区域

第一边界对应绕行路程比直达路程多半个波长；净空评估覆盖整条路径。

9.4.2 通信衰减建模：式9.3与净空

1 km链路中点的第一菲涅尔半径为5.59 m

$$r_F = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad n = 1 \tag{9.3}$$

r_F, λ, d_1, d_2均用m；波长$\lambda = c/f$。
d_1, d_2为横截面到两端的沿路径距离。
近轴近似，半径远小于路径长。

中点条件：两段距离各500 m

$$r_F = \sqrt{\frac{0.125 \times 500 \times 500}{1000}} = 5.59 \text{ m}$$

$$\lambda = c/f = 0.125 \text{ m}$$

$$0.6 r_F = 3.35 \text{ m}$$

本例频率2.4 GHz，$c = 3 \times 10^8$ m/s。净空是障碍顶端到视线的垂直间隔，几何示意见下一页。

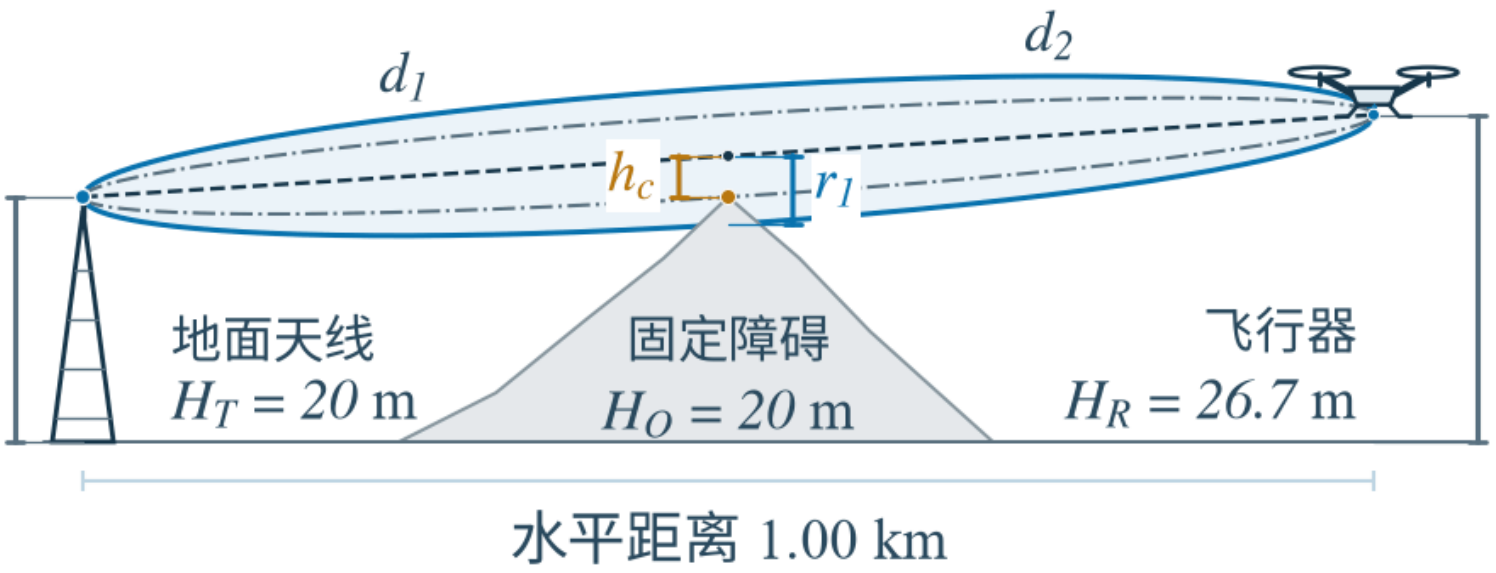
60%半径净空是工程检查量，不是“遮挡40%就损失固定dB”的换算式。

9.4.2 通信衰减建模：菲涅尔净空机制

改变通信端高度，也会改变障碍处的净空

升高天线可增大障碍处净空

— 第一菲涅尔区　　--- 视距线　　-·- $0.6r_1$ 参考



$\lambda = 0.125$ m

纵向放大

障碍处半径

$r_1 = 5.59$ m

净空 h_c

$h_c = 3.35$ m

$0.6r_1 = 3.35$ m

$h_c/r_1 = 0.60$

$$r_1 \approx \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

图：地形不变，视线与菲涅尔区随通信端位置变化；纵向放大

9.4.2 通信衰减建模：式9.4与刀刃绕射

附加衰减必须来自明确的障碍模型

$$L_{\text{total}} = L_{\text{fs}} + \Delta L_{\text{Fresnel}} \tag{9.4}$$

各损耗均为dB。$\Delta L_{\text{Fresnel}}$需由几何、波长及明确的绕射模型计算；遮挡比例本身不确定该值。

$$\nu = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

h：障碍顶端相对视线高度（m），上正下负，与前页净空反号。ν：绕射参数，无量纲；d_1, d_2, λ均为m。

$$J(\nu) = 6.9 + 20\log_{10}\left(\sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1} + \nu - 0.1\right)$$

单刀刃近似：$\nu > -0.78$时用上式；更低时本教学实现取0 dB。J为附加损耗，dB。假设单个孤立薄障碍，忽略镜面反射与穿透。

9.4.2 通信衰减建模：绕射计算与判据

障碍升高会增加绕射损耗、压缩链路裕度

条件：1 km、2.4 GHz，中点单刀刃；自由空间裕度6.96 dB，馈线与天线参数保持不变。

$$h = 0 \Rightarrow \nu = 0, \quad J(0) = 6.9 + 20\log_{10}(\sqrt{1.01} - 0.1) = 6.03\ \text{dB}$$

相对视线高度	附加绕射损耗	剩余门限裕度	本模型的判断
低于视线3.35 m	0 dB（近似）	6.96 dB	满足60%半径净空。
恰好触及视线	6.03 dB	0.92 dB	高于门限，但余量小。
高于视线1 m	8.22 dB	-1.27 dB	低于指定接收门限。

地形精度、有效地球曲率、多障碍及反射会改变实际预测，应匹配所用传播模型。

本章目录

通信建模与干扰仿真

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

9.4.1 信道特性

教材对应：第9.1.5.1节

9.4.2 通信衰减建模

教材对应：第9.1.5.2节

9.4.3 通信损耗模型

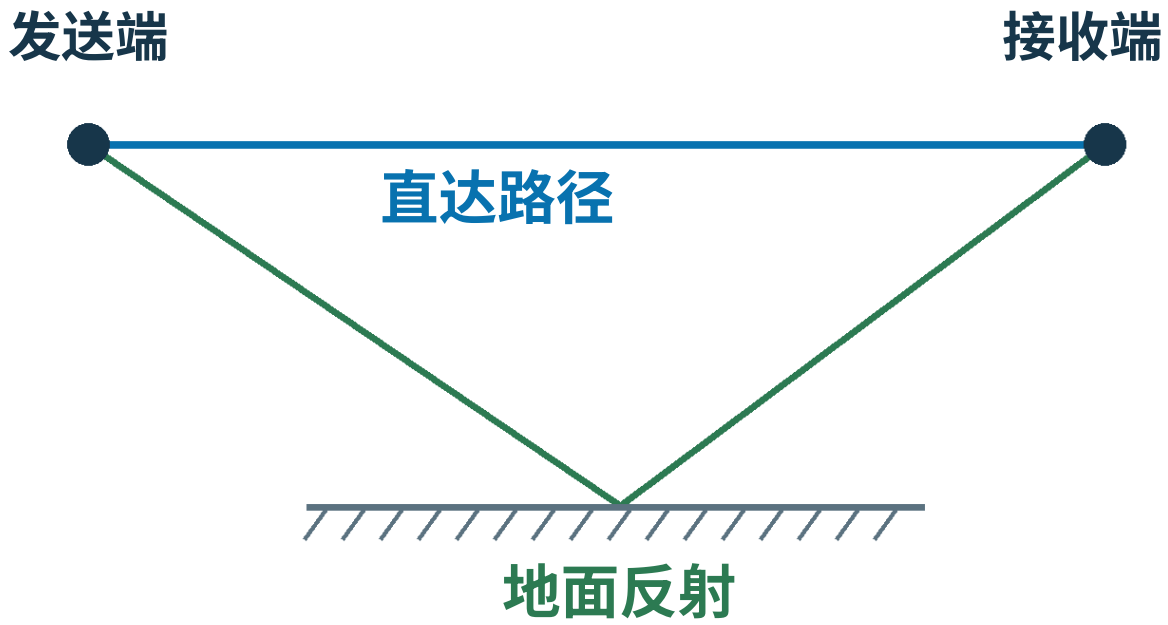
教材对应：第9.1.5.3节

9.4.4 网络仿真方法与NS-3

教材对应：第9.1.5.4至9.1.5.5节

9.4.3 通信损耗模型：几何多径

路径长度差使两路信号带着不同相位相遇



图：直达路径与地面反射路径

输入：两端位置、地形、反射面与材质。
输出：各路径的幅度、时延和相位。

$$\Delta\tau = \frac{\ell_2 - \ell_1}{c}$$

ℓ_1, ℓ_2 分别为直达、反射路径长，m；$\Delta\tau$为时延差，s。1 m路程差对应约3.33 ns时差。

几何模型适合已知场景、波束与定位分析；路径系数仍需电磁模型或测量标定。

9.4.3 通信损耗模型：两径叠加算例

同样的两路幅度可以产生相长或相消

$$P_{\mathrm{rel}} = |1 + ae^{-j\Delta\phi}|^2 = 1 + a^2 + 2a\cos\Delta\phi$$

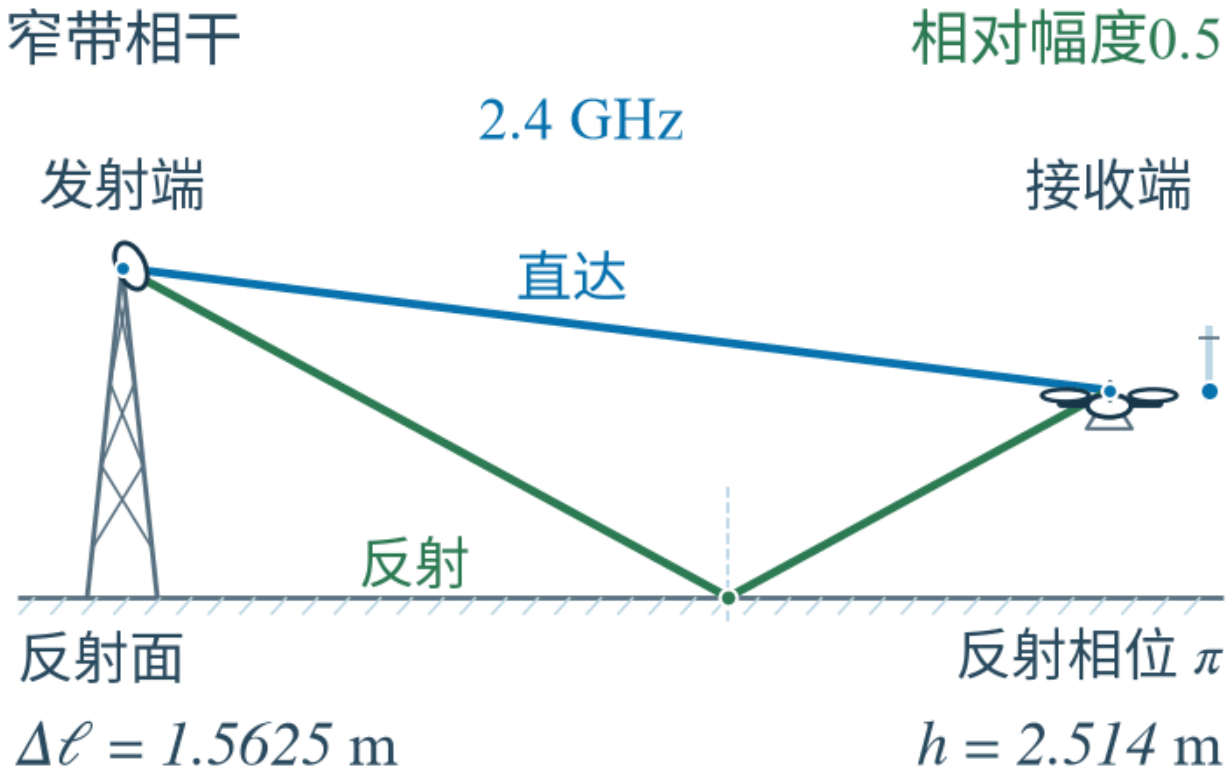
$a = 0.5$为第二路相对幅度；$\Delta\phi$为含反射相位的总相位差，rad；$j^2 = -1$。P_{rel}是相对仅直达路功率的线性比，无量纲。假设两路相干、窄带。

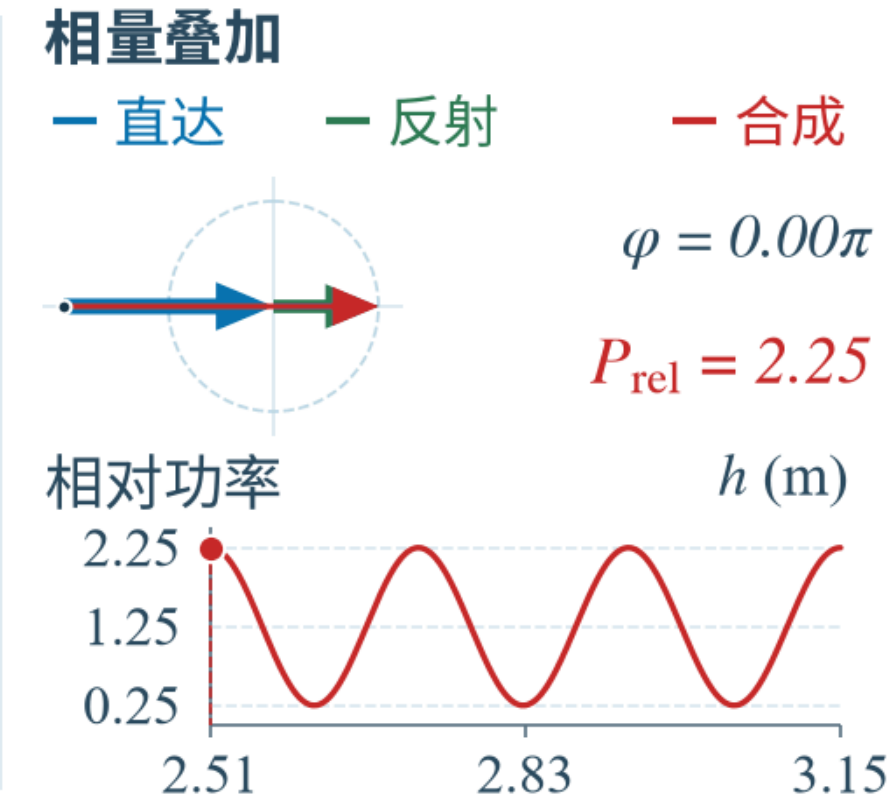
同相叠加	相差四分之一周期	相差半周期
$\Delta\phi = 0$	$\Delta\phi = \pi/2$	$\Delta\phi = \pi$
2.25倍	**1.25倍**	**0.25倍**

2.4 GHz时，路径差每增0.0625 m，传播相位差增半周期。宽带信号还需比较路径时延差与符号持续时间，可能产生符号间干扰。

9.4.3 通信损耗模型：两径干涉过程

接收端移动，路径差改变相位与合成信号强弱





图：接收高度改变路径差，相量夹角与相对功率随之变化

9.4.3 通信损耗模型：几何模型与统计模型

统计模型用延迟抽头表示成组的多径

抽头延迟线（TDL）：每个抽头代表一组多径，用延迟和复增益描述其相位、幅度与到达时间。

同一输入



并行延迟与加权后求和，形成复合接收信号。

几何模型解释特定场景，输入要求高；统计模型适合重复抽样和规模分析。瑞利/莱斯描述小尺度衰落，对数正态阴影描述大尺度波动。

9.4.3 通信损耗模型：气象环境

雨、云雾和气体吸收对应不同气象模型

传播介质	适用模型与输入	输出与限制
雨滴	P.838：频率、雨强、极化与路径仰角。	先得dB/km，再结合有效雨区长度；高频链路可能更敏感。
云雾液态水	P.840：液态水含量、温度及频率。	计算云雾衰减；相对湿度不等于液态含水量。
氧气/气态水汽	P.676：气压、温度、水汽密度和频率。	计算气体吸收；与液滴散射分别处理。

雪粒、气溶胶与可见光传播另选模型；P.840只处理云雾液态水。

9.4.3 通信损耗模型：雨衰一步计算

30 GHz雨衰需要雨强和路径长度共同确定

$$\gamma_R = kR^{\alpha}, \quad A_R = \gamma_R \ell_{\text{rain}}$$

γ_R：比衰减，dB/km；
R：雨强，mm/h；
ℓ_{rain}：雨区长度，km；A_R：雨衰，dB。

取雨强50 mm/h，频率30 GHz，水平极化、近水平路径。
系数$k = 0.2403$，$\alpha = 0.9485$；按本式约定单位代入。

$$\gamma_R = 0.2403 \times 50^{0.9485} \approx 9.82 \text{ dB/km}$$

均匀雨区长度	附加衰减	解释
1.0 km	9.82 dB	整段处于相同雨强。
0.1 km	0.98 dB	同一雨强，但受雨路径较短。

9.4.3 通信损耗模型：信干噪比

有用信号要与干扰和噪声比较

$$\mathrm{SINR} = \frac{P_s}{P_I + P_N}$$

信干噪比（SINR）：P_s, P_I, P_N分别为有用信号、干扰和噪声的线性功率，单位统一为mW。按同一接收带宽和时段统计，干扰与噪声按不相关功率相加。

$$P_{\mathrm{mW}} = 10^{P_{\mathrm{dBm}}/10}$$

$$\mathrm{SINR}_{\mathrm{dB}} = 10\log_{10}\frac{10^{-7}}{10^{-8} + 10^{-10}} = 9.96\ \mathrm{dB}$$

给定：信号-70 dBm，干扰-80 dBm，噪声-100 dBm。移除干扰时信噪比为30 dB；dBm不能直接相加。

9.4.3 通信损耗模型：多用户与资源分配

共享信道同时产生干扰和接入等待

机制	接收或分组现象	适用的建模与调节
同频干扰	多个信号在同频同时到达。	合成接收干扰功率，分析SINR。
邻道干扰	邻近频带能量泄漏进接收带。	加入发射频谱、滤波与接收选择性。
随机接入	竞争、退避与重叠发送。	按接入协议建事件；泊松到达只是一种业务假设，冲突率取决于协议。

时分多址（TDMA）分配时隙，频分多址（FDMA）分配频带，码分多址（CDMA）用码区分用户。调度可减少重叠，代价包括等待和资源开销；队列仍需单独分析。

9.4.3 通信损耗模型：外部干扰与鲁棒性

外部电磁干扰与协议数据异常需要分层注入

注入层	教学模型的输入	应观察的结果
接收信号	增加宽带随机噪声， 或设定干扰功率与作用窗口。	SINR、误包与恢复过程； 匹配带宽和波形条件。
链路/网络	指定受影响链路、时间段， 施加丢包、时延或资源限制。	路由切换、状态新鲜度、 业务完成率与网络开销。
数据/系统	离线注入重复、过期或错误数据； 导航观测异常另设模块。	时间戳/序号检查、完整性校验、 冗余观测和降级响应。

噪声功率、分组损失与数据语义分别记录，再分析它们如何影响任务。

本章目录

通信建模与干扰仿真

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

9.4.1 信道特性

教材对应：第9.1.5.1节

9.4.2 通信衰减建模

教材对应：第9.1.5.2节

9.4.3 通信损耗模型

教材对应：第9.1.5.3节

9.4.4 网络仿真方法与NS-3

教材对应：第9.1.5.4至9.1.5.5节

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：方法选择

仿真方法由需要解释的现象决定

方法	输入与输出	适合的问题与边界
Python / MATLAB C++	位置、参数与随机数， 输出功率或预设丢包/时延。	快速验证算法与敏感性； 细致协议行为需自行加入。
三维引擎（如UE）	场景网格与两端位姿， 输出遮挡、距离、法向与材质。	几何和空间关系； 另接无线电传播模型。
NS-3等网络仿真器	节点、设备、信道与业务， 输出分组接收、时延与队列事件。	接入、路由、负载与协议比较； 精度取决于选用模块和参数。

联合建模：几何进入传播模型，信道结果进入网络，控制端消费到达数据。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：简化模型完整循环

七行Python复算拉远与附加损耗过程

条件：2.4 GHz，门限-85 dBm；发射与天馈合计项22 dBm。
0至20 s每0.1 s计算一次；8至12 s另加8 dB损耗。

```
from math import log10
for i in range(201):
    t = i / 10; d = 500 + 50 * t
    extra = 8 if 8 <= t <= 12 else 0
    loss = 32.44 + 20*log10(d/1000) + 20*log10(2400)
    pr = 22 - loss - extra
    print(t, d, round(pr, 2), pr >= -85)
```

在Python解释器中执行此完整代码，输出时间(s)、距离(m)、接收功率(dBm)和门限判断，循环结束即退出。只算链路门限，未模拟包、重传或队列。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：纯数值运行结果

附加损耗窗口内门限裕度转为负值

时间(s)	距离(m)	附加损耗(dB)	接收功率(dBm)	门限裕度(dB)
0	500	0	-72.02	12.98
8	900	8	-85.13	-0.13
10	1000	8	-86.04	-1.04
12	1100	8	-86.87	-1.87
12.1	1105	0	-78.91	6.09
20	1500	0	-81.57	3.43

201点中41点低于门限，均在8至12 s。此为纯数值模型结果；
采样比例不是丢包率，也不是平台实测。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：几何与电磁参数

UE提供场景几何，传播模型负责无线电计算

两端位置与场景 → 几何查询
命中点、法向、距离 → 无线传播模型
损耗、时延、多径

接口字段	传递的含义	本例如何消费
场景与位姿	坐标系、单位、时间戳。	转换到统一米制坐标，确定1 km路径。
障碍与材质	遮挡位置、高度、材质标识。	中点屋顶高于视线1 m； 材质参数需另行定义或标定。
传播结果	频率相关损耗和时延。	单刀刃近似得到8.22 dB； 把该值传给链路或网络模型。

碰撞检测不会自动给出电磁损耗；复杂反射、绕射及穿透要由专用模型补齐。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：核心建模对象

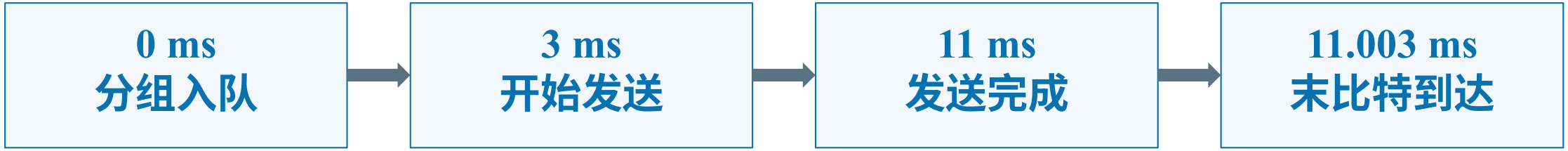
NS-3用节点、应用、设备和信道组织网络



移动模型（MobilityModel）给出位置和运动；传播与接收模型决定信号能否形成可接收分组。一个节点可以安装多块NetDevice。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：事件时间与时延

离散事件推进到下一次网络状态变化



$$T = W + L/R + d/c$$

$W = 3\ \text{ms}$：排队；$L = 8000\ \text{bit}$：本例串行化位数；$R = 10^6\ \text{bit/s}$：速率；$d = 1000\ \text{m}$；$c = 3 \times 10^8\ \text{m/s}$。$T$为总时延；未计报头、处理与重传。

$$T = 3 + 8 + 0.00333 = 11.00333\ \text{ms}$$

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：NS-3配置流程

协议实验要同时固定拓扑、业务和统计口径

创建节点与移动 → 配置设备与信道 → 安装栈与路由 → 运行业务
统计结果

配置层	必要输入	比较时固定或变化
物理与链路	位置、频率、功率、带宽、 调制编码、接入与传播模型。	分析路由时保持无线参数一致。
网络与业务	路由方式、目的节点、 包长、生成频率与起止时刻。	先给同样流量，再比较交付与开销。
重复与输出	随机种子、重复次数、 统计层级和测量时间窗。	报告变异，保留输入与事件日志。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：结果指标与FlowMonitor

接收率、吞吐量和时延必须使用同一统计口径

$$\mathrm{PDR} = N_{\mathrm{rx}}/N_{\mathrm{tx}} \qquad Q = 8B_{\mathrm{rx}}/T_{\mathrm{obs}}$$

接收率（PDR）无量纲；$N_{\mathrm{tx}}, N_{\mathrm{rx}}$分别为同一流的发送、接收包数。$B_{\mathrm{rx}}$为接收字节数，$T_{\mathrm{obs}}$为统计时长(s)，$Q$为吞吐量(bit/s)。

记录层	记录什么	解释条件
FlowMonitor	IP层流的包数、字节、时延； 时延均值仅计已收分组。	主要统计单播TCP/UDP； IP字节数不等于应用净载荷。
应用/抓包	序号、生成和接收时刻； PCAP、trace及可视化。	可用Wireshark核对报文， NetAnim等显示事件与运动。
结束时刻	先停发，再让在途和队列包排空。	区分已丢失、仍在途和统计截断； iPerf仅在兼容的实际流量端点使用。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：学习入口

平台资料用于核对模型怎样接入消息通路

安装版阅读根目录：[安装目录]/RflySimAPIs/9.RflySimComm/

粗粒度模型与消息转发

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

阅读Readme.pdf、NetworkSimulation.py与common.py，识别质量矩阵、消息和转发之间的关系。

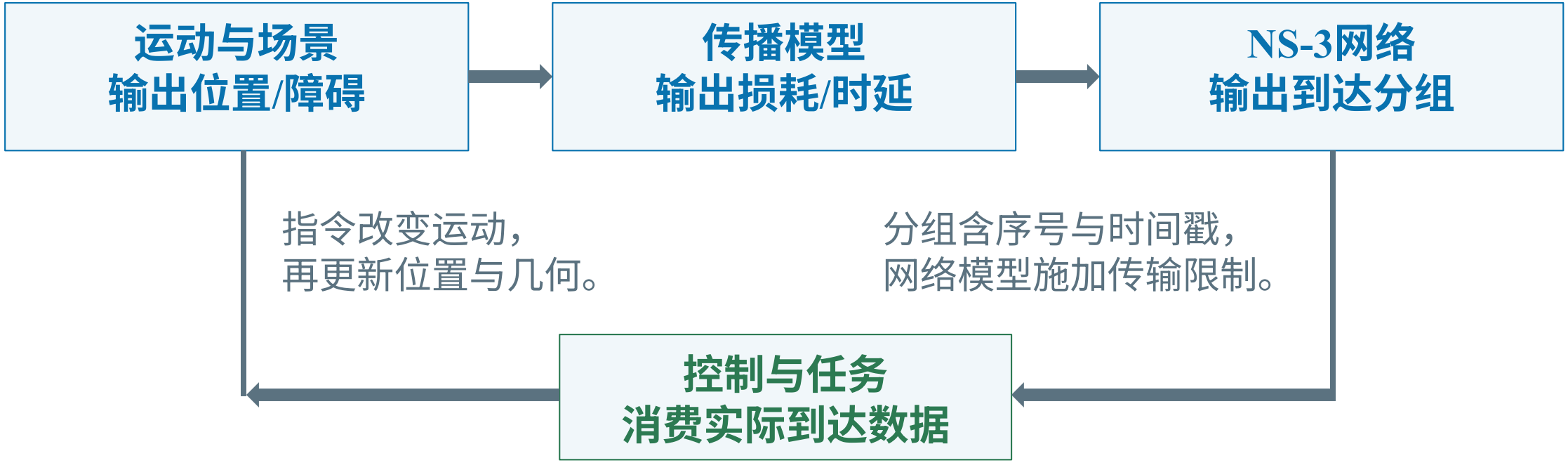
NS-3依赖与定制接口

0.ApiExps/e6.NS3DepsTestExps/

阅读Readme.pdf、RflyNet.cc与TestSend.py。WSL、NS-3版本及定制模块以本安装版说明为准；运行流程见课件9.7。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：模型接口与时间

联合仿真要传递几何、信道与分组三类信息



接口必须约定坐标系、m/s等单位、更新频率和时钟。离线仿真不要求墙钟同步，实时联合仿真还要处理计算落后与缓冲。

练习与讨论

为何链路预算通过，协同状态仍可能不可用

已知：1 km、2.4 GHz；自由空间裕度6.96 dB；中点屋顶低于视线2 m。多个节点同频发送，接收程序偶尔读到过期状态。

1. 几何：计算中点半径及60%净空。屋顶是否满足？能否直接从侵入比例得到dB？

2. 功率：若用单刀刃近似，怎样定义高度和附加损耗？同频干扰还需哪些输入？

3. 网络：选择Python、UE或NS-3及其组合，区分传播退化、接入冲突、队列等待与过期数据。

参考要点

参考要点：先定位原因，再选择模型与证据

问题	参考计算或证据	解释
净空	半径5.59 m，60%为3.35 m； 当前只有2 m。	净空检查不满足； 尚不能仅据此给出损耗值。
绕射/干扰	单刀刃高度取-2 m； 干扰需接收功率、频段、作用时间。	绕射损耗约1.91 dB， 剩余裕度约5.05 dB； 干扰功率线性相加再算SINR。
协议与状态	固定轨迹/业务；记录功率、序号、 生成/到达时间、队列和重传。	Python查基线，UE给几何， NS-3解释交付与等待原因。

可用性同时看功率、分组交付与状态时效；模型结论不超出其假设。

9.4.4 网络仿真方法与NS-3：参考资料

按传播、气象和协议模块查阅官方资料

自由空间与绕射：P.525（同站检索）与P.526
https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526/en

气象：P.838雨衰；P.840云雾；P.676气体（同站检索）
https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en

NS-3：教程中的对象与首个实验
https://www.nsnam.org/docs/release/3.44/tutorial/

NS-3：模型假设、无线模块与FlowMonitor
https://www.nsnam.org/docs/models/

UE：搜索Traces Overview，阅读几何查询接口
https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine

本节小结

通信建模把几何、功率和分组行为连起来

建立基线：自由空间损耗加天线与馈线预算，得到接收功率及指定模式的门限裕度。

补足环境：菲涅尔净空给几何尺度；绕射、多径、雨雾与气体模型给相应传播影响。

解释分组：SINR、接入、重传与队列共同影响交付和状态时效。dBm不能直接相加。

选择工具：Python算基线，UE提供几何，NS-3处理事件；联合接口对齐时间、单位和坐标。

易错点：净空比例≠固定损耗，门限采样比例≠丢包率，实时运行≠模型已标定。