低空数字孪生：从物理环境到信道地图

王新奕
北京理工大学



内容

一. 低空数字孪生：研究背景与需求

二. 物理环境孪生：动态认知与决策

三. 信道地图孪生：构建与网络优化

PART 01

低空数字孪生研究背景与需求

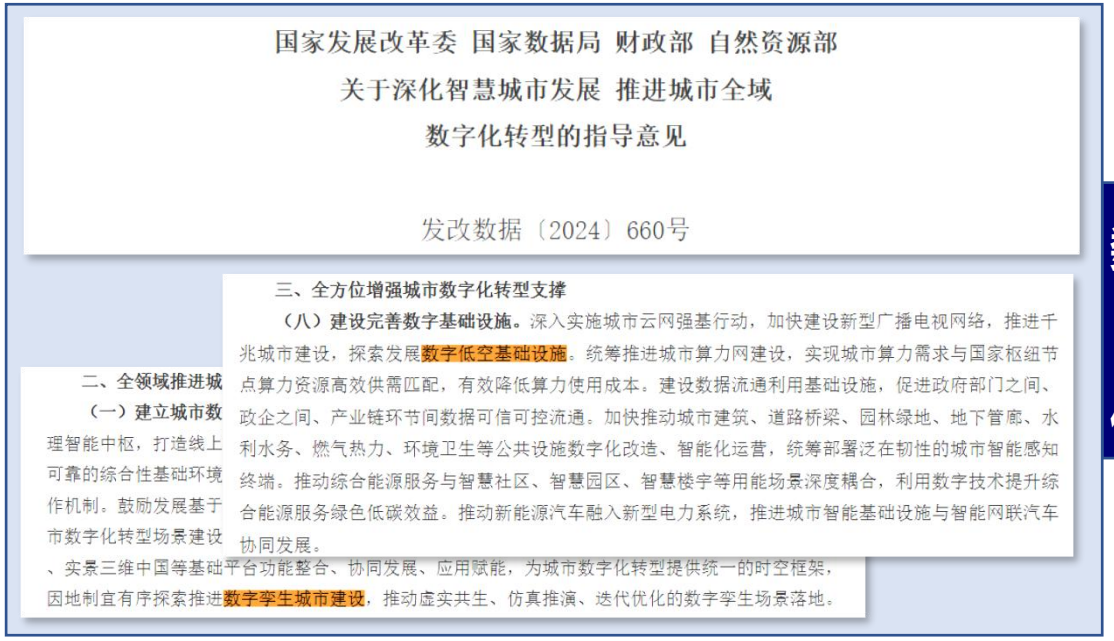


低空数字孪生：研究背景

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 政策与产业发展

- 2024年5月，**国家发改委**发布《关于深化智慧城市发展 推进城市全域数字化转型的指导意见》，提出推进**数字孪生城市建设**，探索发展**数字低空**基础设施。
- 2025年12月，**中国信通院**发布“2025年数字孪生十大关键词”，“**数字孪生低空经济**”位列首位，体现数字孪生向低空场景拓展的产业关注度。



国家发展改革委 国家数据局 财政部 自然资源部

关于深化智慧城市发展 推进城市全域

数字化转型的指导意见

发改数据〔2024〕660号

三、全方位增强城市数字化转型支撑

（八）建设完善数字基础设施。深入实施城市云网强基行动，加快建设新型广播电视网络，推进千兆城市建设，探索发展数字低空基础设施。统筹推进城市算力网建设，实现城市算力需求与国家枢纽节点算力资源高效供需匹配，有效降低算力使用成本。建设数据流通利用基础设施，促进政府部门之间、政企之间、产业链环节间数据可信可控流通。加快推动城市建筑、道路桥梁、园林绿地、地下管廊、水利水务、燃气热力、环境卫生等公共设施数字化改造、智能化运营，统筹部署泛在韧性的城市智能感知终端。推动综合能源服务与智慧社区、智慧园区、智慧楼宇等用能场景深度耦合，利用数字技术提升综合能源服务绿色低碳效益。推动新能源汽车融入新型电力系统，推进城市智能基础设施与智能网联汽车协同发展。

二、全领域推进城

（一）建立城市数

理智能中枢，打造线上

可靠的综合性基础环境

作机制。鼓励发展基于

市数字化转型场景建设

、实景三维中国等基础平台功能整合、协同发展、应用赋能，为城市数字化转型提供统一的时空框架，因地制宜有序探索推进数字孪生城市建设，推动虚实共生、仿真推演、迭代优化的数字孪生场景落地。

数字孪生

迈向

低空网络



中国信通院发布2025年数字孪生十大关键词

2025年12月4日，第二届数字孪生技术与产业发展大会暨场景培育与开放创新大会在苏州举办。会上，中国信息通信研究院（简称“中国信通院”）产业与规划研究所副所长牟春波正式发布并解读“2025年数字孪生十大关键词”，十大关键词分别是数字孪生低空经济、数字孪生韧性城体、时空智能、高性据供给。总体来看，合作用下，应用场景

一、数字孪生低空经济

低空经济是一种依托三维空间发展的经济形态。低空空域数字孪生系统，可实现低空空域可视、可计算、可分析，是低空空域管理和场景应用的重要基础。一方面，国家与地方加快政策布局，全面激活低空经济需求。中央经济工作会议、政府工作报告、二十届三中全会、四中全会等均明确加大低空经济发展要求，江苏、浙江、广东等地区率先探索数字低空建设，将数字孪生作为促进低空经济高质量发展的关键技术。另一方面，相关行业企业纷纷抢滩“数字孪生+低空经济”新蓝海。低空飞行器、数字孪生、时空信息、气象等领域技术服务商、场景运营商依托自身技术和市场优势加快布局。展望未来，数字孪生与卫星互联网、时空大数据、人工智能等技术融合发展，数字孪生城市向“天空地海一体化”拓展，助力推动全空间无人体系建设。

低空产业推动数字孪生从静态环境展示走向动态环境认知与网络智能决策

低空数字孪生：研究背景

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

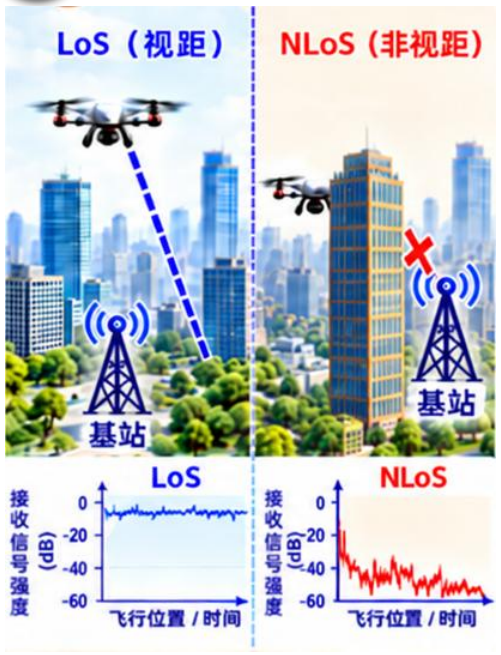
● 低空信息网络面临挑战

1 环境未知/动态



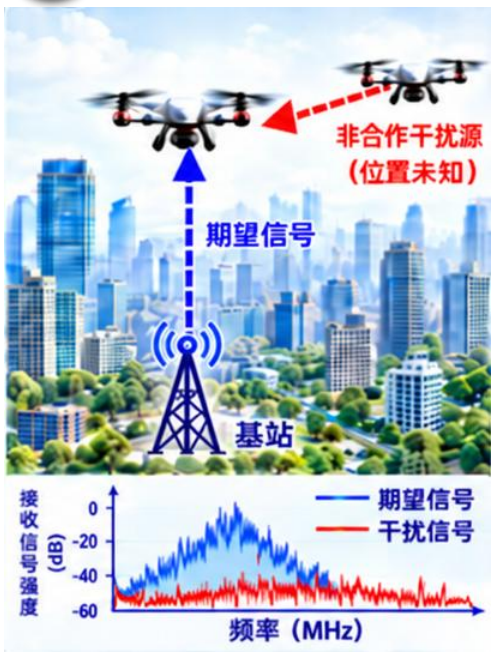
建筑物拓扑先验不准确或缺失
难以提前判断遮挡与碰撞风险

2 信道快速时变



链路快时变，频繁信道测量开销大
统计模型难刻画环境差异

3 外源干扰复杂



非合作干扰源位置与参数未知
难以准确预测实际通信质量

4 多维资源受限



低空多维资源受限
波束管理与切换决策高度耦合

物理环境与无线传播状态具有空间差异和动态不确定性，传统静态建模难以支撑预测式网络优化。

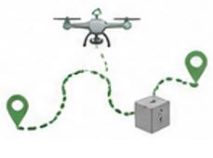
低空数字孪生：研究思路

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

物理环境孪生——从环境不确定到动态认知

目标：面向环境先验不准确或缺失的场景，通过任务过程中的**持续感知更新物理环境模型**，支撑无人机轨迹与安全决策。



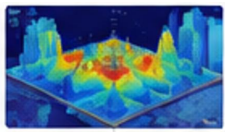
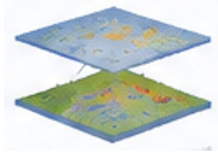
1. 初始环境先验	2. 实时感知反馈	3. 物理孪生更新	4. 自主决策执行
			
• 地图/历史数据 • 粗略环境模型 • 不完整信息	• 图像、激光雷达 • 雷达、毫米波等 • 机载传感器数据	• 环境重建 • 变化检测 • 虚实同步更新	• 安全评估 • 路径规划 • 避障与部署决策

通过“感知—更新—决策”闭环，使无人机能够在不确定环境中持续调整行动。

信道地图孪生——从环境先验到传播预测[1]

目标：面向具备一定物理环境先验的场景，构建**环境特定的信道知识地图**，预测不同位置与网络配置下的通信性能。



1. 物理环境先验	2. 信道知识建模	3. 传输性能预测	4. 网络优化决策
			
• 建筑物、地形 • 基站位置 • 道路、地物等	• 三维信道地图 • 干扰感知地图 • 可微信道地图	• 覆盖预测 • SINR/速率预测 • 波束效果预测	• 无人机轨迹优化 • 波束预测与赋形 • 资源分配优化

利用信道地图提前评估候选网络动作，减少实际测量和试错开销。

物理环境孪生提供动态空间认知，信道地图孪生提供传播性能预测，共同支撑低空网络的预测式优化

[1] Y. Zeng and X. Xu, "Toward Environment-Aware 6G Communications via Channel Knowledge Map," IEEE Wireless Communications, vol. 28, no. 3, pp. 84-91, June 2021.

低空物理环境孪生

● 从环境感知到动态认知更新

- **需求牵引：**应急通信等场景中，建筑物拓扑等环境信息可能存在**误差或缺失，静态模型难以支撑可靠决策。**
- **实现方法：**利用无人机任务执行过程中获得的环境观测**持续修正物理环境模型**，并将更新后的环境状态用于**轨迹规划、避障与安全评估。**

01 物理环境表征



建筑、障碍与节点状态联合表征

02 环境感知更新



修正环境认知，持续更新地图

03 轨迹与安全决策



轨迹规划、避障与安全评估

低空信道环境孪生

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 从环境知识到传输性能预测

- **需求牵引**：低空无线传播受**建筑遮挡、三维位置及天线配置**共同影响，传统统计模型难以准确刻画。
- **技术思路**：构建融合**环境拓扑、收发机位置及网络配置**的信道知识地图，实现**环境特定的传输性能预测**，为网络**低开销智能优化**提供先验信息。

01 输入条件



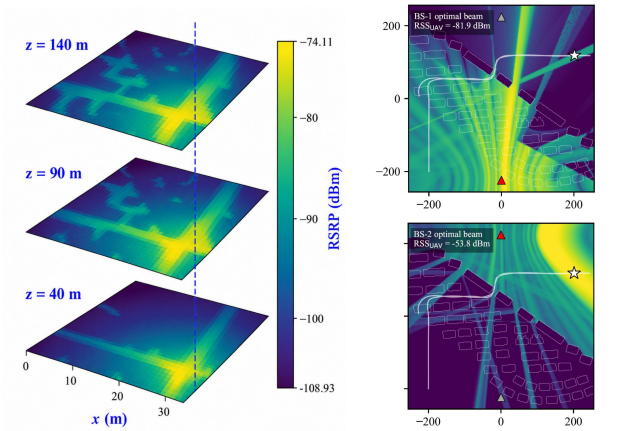
三维建筑与地形

基站与终端位置

频段与波束信息

融合环境拓扑、位置与网络配置先验

02 信道地图构建



重构环境特定的无线传播特性

03 网络优化应用



支撑轨迹-波束-切换决策

PART 02

物理环境孪生
动态认知与决策



环境先验逐步缺失下的物理环境孪生

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 从粗略环境先验到未知环境下的自主决策

➢ 面向物理环境信息不准确或缺失的低空场景，研究**持续感知驱动的环境认知更新**，以及**基于虚拟环境的轨迹优化与安全决策**。

01 具身智能增强的UAV轨迹设计



粗略环境先验

动态用户位置

实时感知 → 环境认知更新 → 在线轨迹决策

02 数字孪生辅助的UAV轨迹设计



环境完全未知

试错风险加剧

虚拟环境预训 → 环境动态更新 → 动作安全预检

从利用实时感知修正环境认知，发展到虚拟训练、在线环境更新与动作安全评估相结合

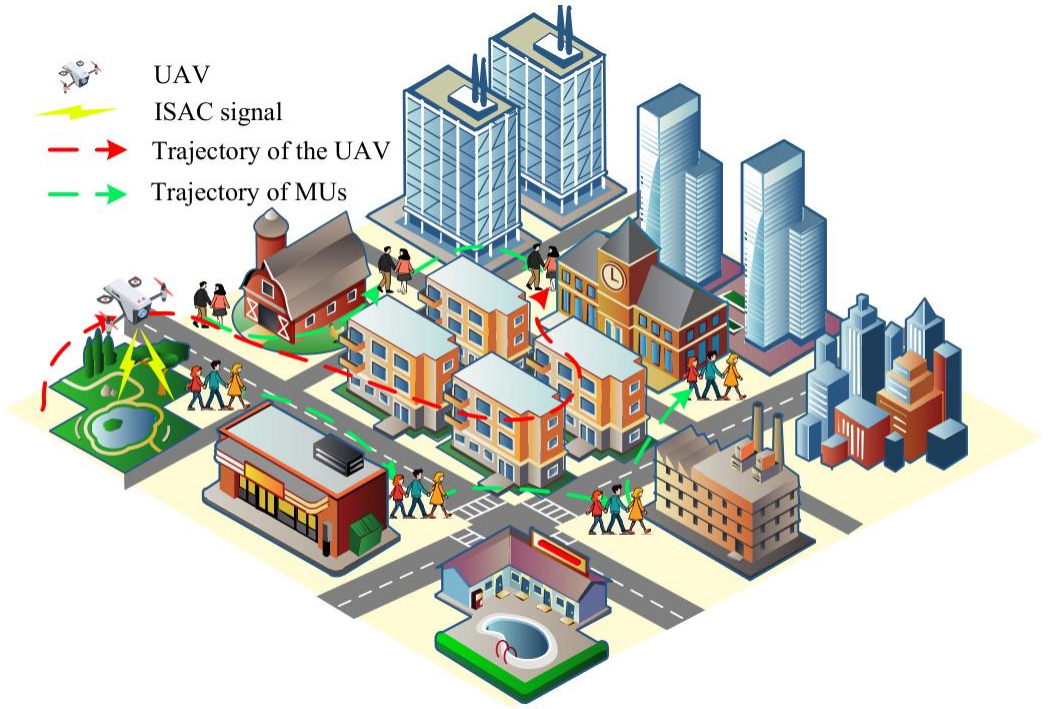
具身智能增强的UAV轨迹设计

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

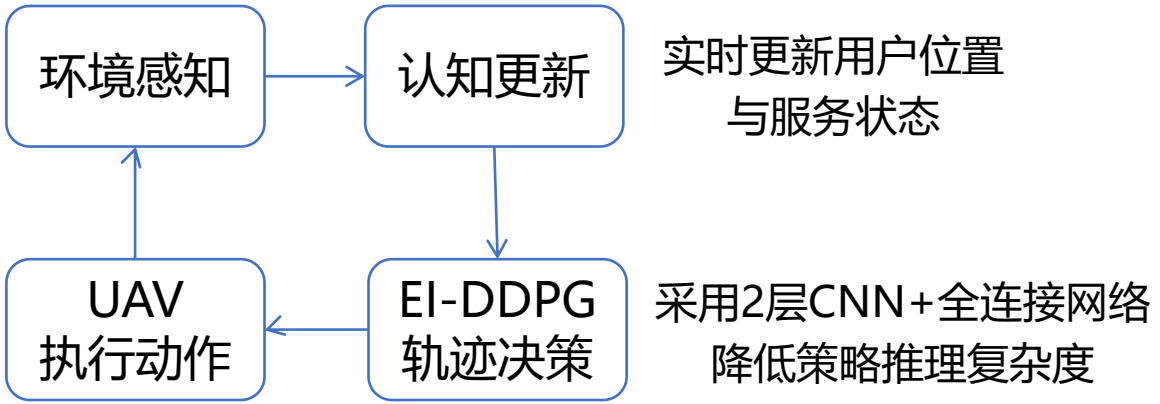
研究动机

- 研究场景：建筑位置与形状存在**先验误差**，地面用户动态移动，静态环境模型难以支撑**持续可靠轨迹决策**。
- 解决思路：利用通感融合**持续修正环境认知**，结合移动用户状态，通过**轻量化EI-DDPG**实现动态轨迹决策。

物理环境：边服务、边感知



决策机制：机载具身智能闭环



将持续更新的物理环境认知引入UAV轨迹决策，
实现感知与行动相互反馈的具身智能闭环。

[2] J. Luo, Z. Fei, **X. Wang***, S. Tang, Z. Liu and Y. Zhou, "Toward Low-Altitude Embodied Intelligence: A Sensing-Communication-Computation-Control Closed-Loop Perspective," IEEE Commun. Mag., vol. 64, no. 9, pp. 110-117, September 2026.

具身智能增强的UAV轨迹设计

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● MDP 设计（状态 · 动作 · 奖励 · 约束）

状态 S：100×100 栅格 ——随环境感知和用户移动持续更新



动作空间： $A = \{v, \psi_v, \psi_h\}$：**速度 / 垂直角 / 水平角**，三维连续

状态信息：

环境认知：粗略地图 + ISAC感知确认的建筑信息

用户状态：位置 + 累计服务状态

UAV状态：当前位置 / 飞行高度

安全约束：通过障碍约束与碰撞惩罚抑制危险动作

C1–C3 动作范围 · C4 不进入建筑 · **碰撞 −100 兜底**

奖励 R：吞吐量 × Jain 公平性，兼顾网络总体服务效率和不同用户之间的服务公平性。

$$r_t = J_t \cdot \Sigma D \; - \; 碰撞惩罚 \; - \; 低速惩罚 \qquad J_t = (\Sigma D)^2 / (M \cdot \Sigma D^2)$$

MDP 状态更新： UAV 观测 s_t → 生成动作 a_t → 执行动作 → ISAC感知 / 用户移动 → 更新环境认知 → r_t, s_{t+1}

[3] J. Luo, Z. Fei, **X. Wang**, et al., "Embodied Intelligence-Enhanced UAV Trajectory Design via Deep Reinforcement Learning," IEEE Trans. Veh. Technol., 2026.

具身智能增强的UAV轨迹设计

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 基于动态环境认知的EI-DDPG轨迹决策

① 环境认知更新

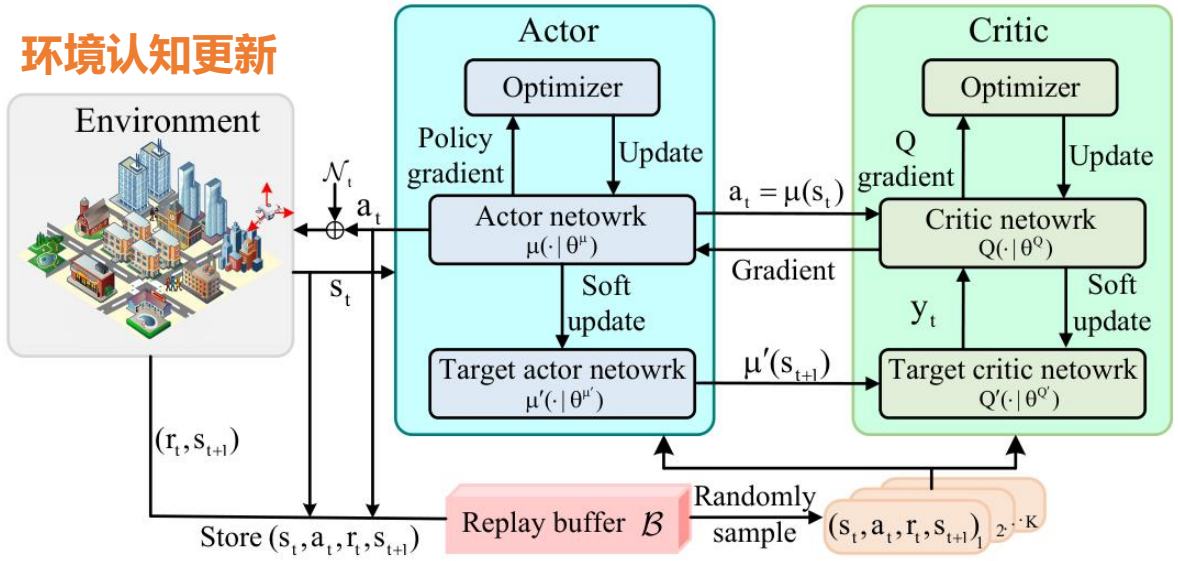
ISAC观测持续修正粗略建筑地图，用户移动与服务状态同步更新

② 轻量化连续决策

采用CNN提取空间状态特征，利用DDPG生成三维连续飞行动作，通过Actor-Critic结构学习轨迹决策策略。

③ 感知与行动反馈

无人机执行动作后获得新的环境观测，并将更新后的状态用于下一时刻决策。



EI-DDPG 训练与执行框架
Actor生成轨迹动作，Critic评价动作价值；环境状态随感知结果持续更新。

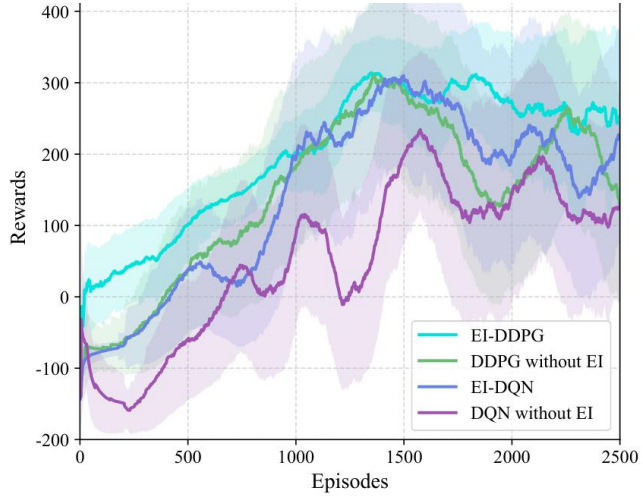
相较于不引入环境认知更新的DDPG基线，EI-DDPG利用动态环境状态提高策略的环境适应能力。

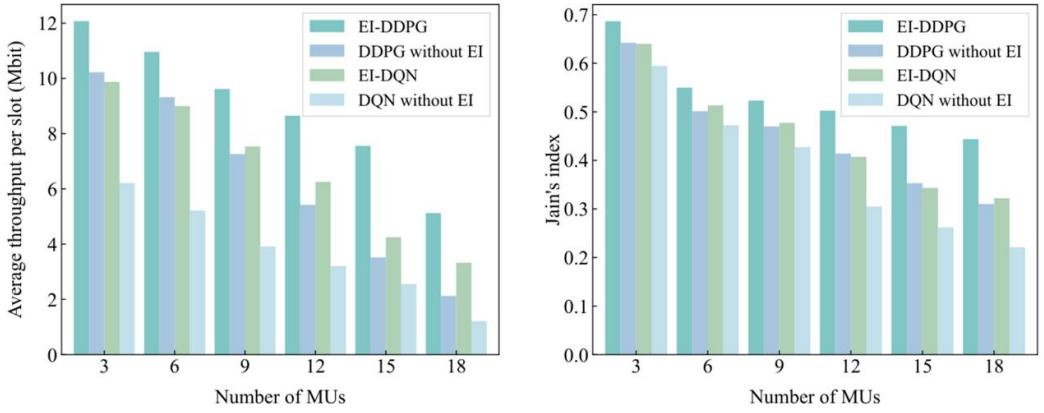
[3] J. Luo, Z. Fei, **X. Wang**, et al., "Embodied Intelligence-Enhanced UAV Trajectory Design via Deep Reinforcement Learning," IEEE Trans. Veh. Technol., 2026.

具身智能增强的UAV轨迹设计

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

- **仿真验证：** 对比三类基线（DDPG w/o EI | EI-DQN | DQN w/o EI）
  - **训练性能**：在所设仿真条件下，EI-DDPG相较于对比方法取得**更快的奖励收敛速度**和**更高的稳态奖励**。
  - **通信性能**：EI-DDPG在**平均吞吐量**和**Jain公平指数**方面表现更好，体现环境认知更新对通信服务的改善作用。





(a) Average throughput　　(b) Jain's index

机制验证： **对比EI-DDPG与不引入环境认知更新的DDPG，验证性能改善不仅来自强化学习算法选择，也来自感知驱动的环境状态更新。**

已有粗略地图时，可以通过实时感知不断修正轨迹；
当实际环境缺少可靠先验时，还需要降低真实探索过程中的试错风险

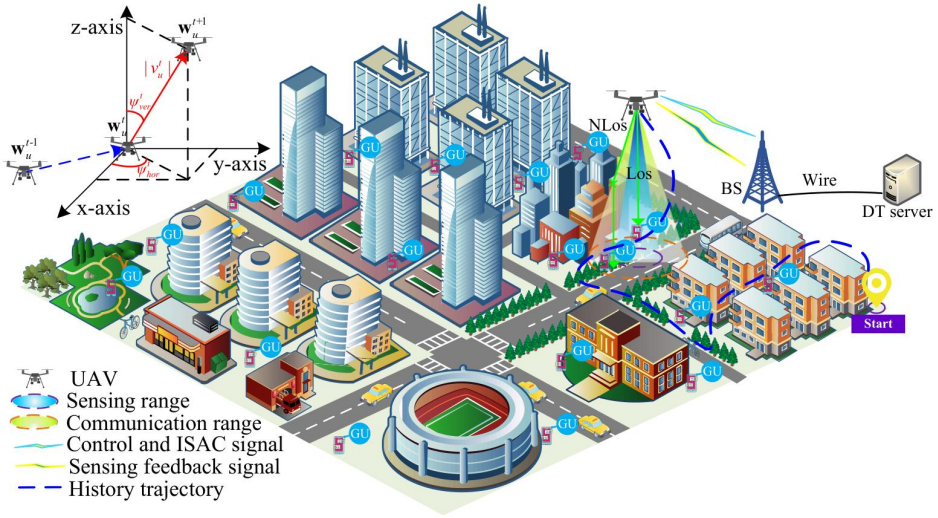
从在线环境适应到数字孪生辅助安全决策

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 未知环境下的UAV轨迹设计

- **进一步挑战**： 建筑位置与高度**完全未知**，缺少可靠的环境先验，**真实探索**面临**较高碰撞风险**和**训练成本**。
- **解决思路**： 在多种构造的虚拟场景中离线训练**通用轨迹策略**，部署时利用实时感知更新任务环境，并在执行候选动作前进行虚拟安全评估。

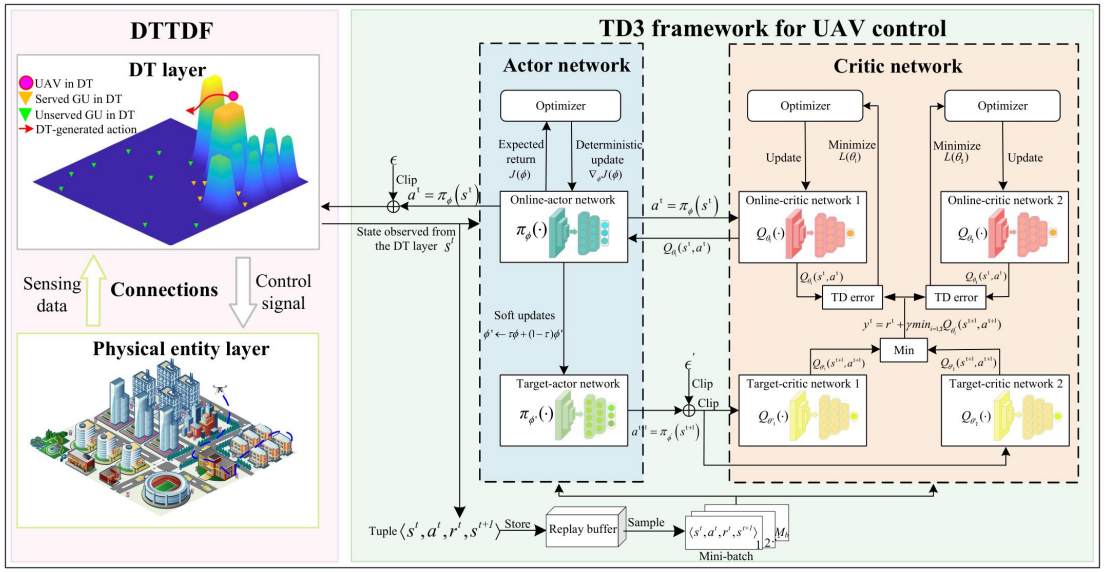
物理环境：通信、感知与反馈



三时隙物理交互（τ1 = τ2 = 0.5 s，τ3 = 0.2 s）

δ1 控制与数据下发 → δ2 通信 + 感知 → δ3 感知回传、更新 VE

训练—部署双阶段框架（DTTDF）



离线训练：多样虚拟场景 → 状态任务建模 → SA+TD3训练 → 轨迹决策策略

在线部署：UAV感知 → 环境更新 → 候选轨迹生成 → 安全预检 → 执行/调整

[4] J. Luo, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "Trajectory Design for UAV-Based Low-Altitude Wireless Networks in Unknown Environments: A Digital Twin-Assisted TD3 Approach," IEEE Internet of Things Journal, 2026.

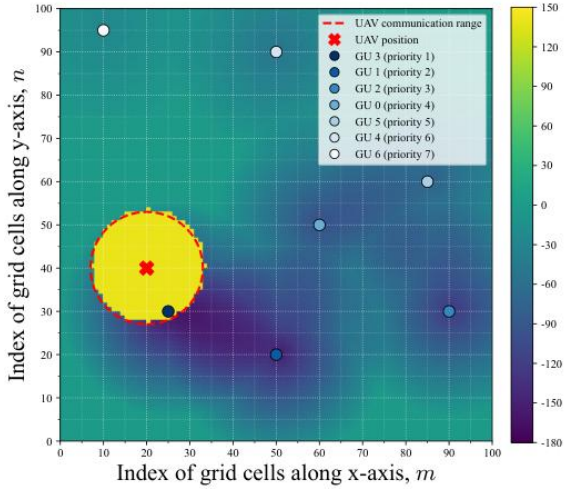
数字孪生辅助 UAV 轨迹设计

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 面向服务与避障的双势场状态建模

状态 S = [S_1, S_2]：两个 100×100 栅格矩阵

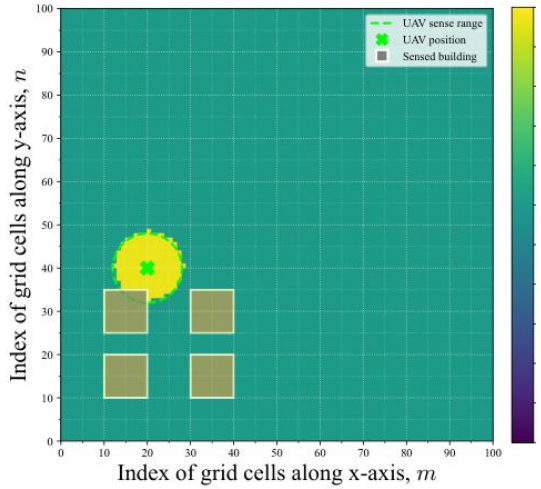
服务需求势场



(a) $\mathbf{S}_1^t$

反映用户服务优先级与空间分布

障碍物风险场



(b) $\mathbf{S}_2^t$

反映已感知建筑位置、高度

奖励 R：四类加权 + 完成奖励

奖励类别	优化目的
安全奖励	避免碰撞与危险动作
效率奖励	缩短任务完成时间
服务奖励	满足用户数据传输需求
探索奖励	鼓励有效环境探索

动作 A={v, ψ_{ver}, ψ_{hor}}：**速度/垂直角/水平角**，三维连续

约束与终止条件 每用户累计传输 ≥ 10 Mbits

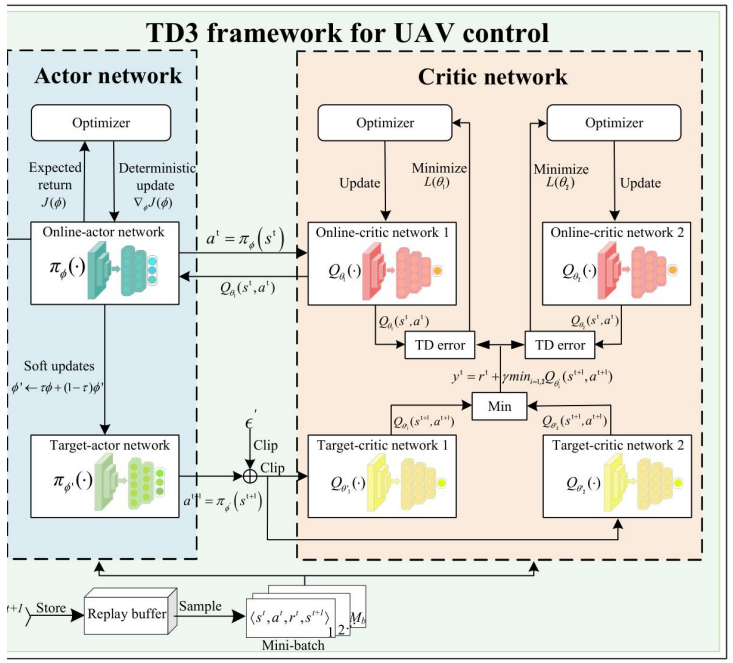
两矩阵分别输入双分支 CNN，经通道/空间注意力融合，将实时更新的环境信息转化为可参与轨迹决策的状态表征，使无人机同时考虑“去哪里服务”和“如何安全到达”。

[4] J. Luo, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "Trajectory Design for UAV-Based Low-Altitude Wireless Networks in Unknown Environments: A Digital Twin-Assisted TD3 Approach," IEEE Internet of Things Journal, 2026.

数字孪生辅助 UAV 轨迹设计

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 数字孪生辅助的服务调度、轨迹优化与安全预检



截断双Q学习：缓解价值估计过高问题

目标策略平滑：提高对局部估计误差鲁棒性

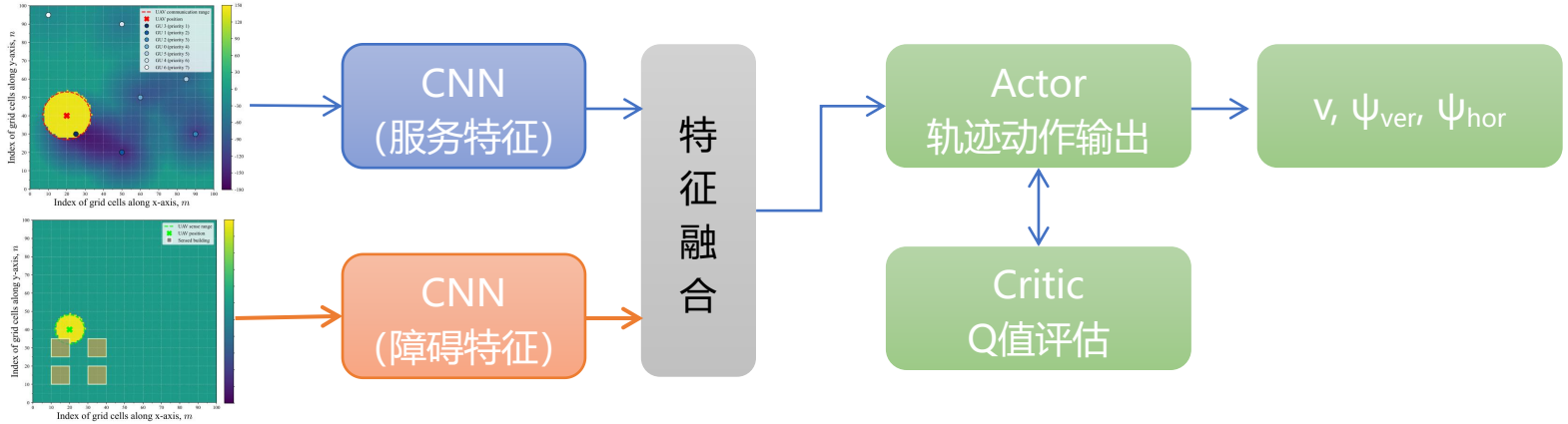
延迟策略更新：提高训练稳定性

用户服务调度：模拟退火（SA）确定服务顺序

服务顺序是组合优化，直接嵌入 RL 会扩维——**外层 SA 出初始调度，内层 TD3 学轨迹**

两点改进：最近邻贪心初始化 + 温度自适应邻域 → 收敛更快、路径更短

基于TD3的连续轨迹决策：根据服务势场和避障场，输出三维连续动作



数字孪生安全预检：利用当前虚拟环境评估候选动作，阻止风险动作

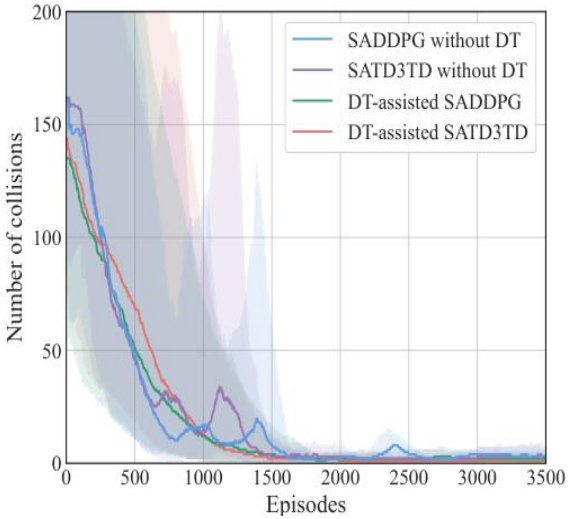
[4] J. Luo, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "Trajectory Design for UAV-Based Low-Altitude Wireless Networks in Unknown Environments: A Digital Twin-Assisted TD3 Approach," IEEE Internet of Things Journal, 2026.

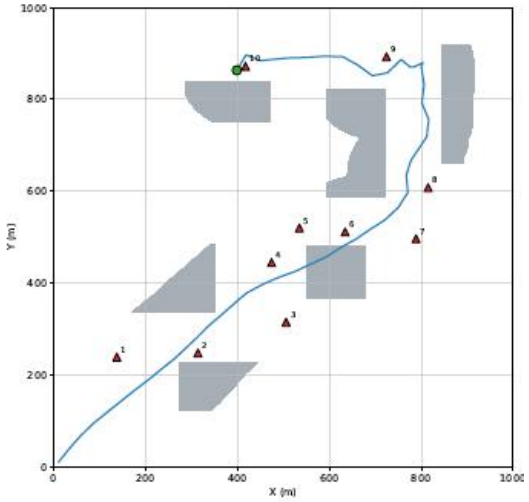
数字孪生辅助 UAV 轨迹设计

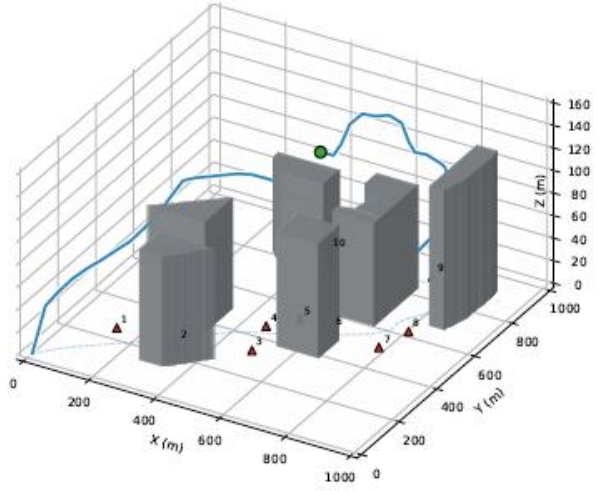
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

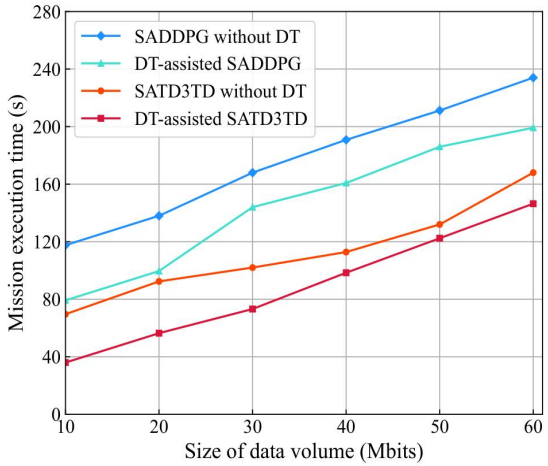
● 仿真验证

- **训练与安全性能：** 在所设仿真环境中，数字孪生辅助策略改善训练收敛表现，并有效**降低仿真碰撞发生率**。
- **任务执行性能：** 基于动态环境认知实现**二维/三维避障规划**，在不同数据传输需求下均表现出**较高的任务执行效率**。









碰撞风险抑制
DT辅助降低碰撞风险，TD3提升训练稳定性

二维轨迹规划
综合用户需求与障碍分布，实现有效路径规划

三维避障决策
根据建筑空间信息调整航迹，实现三维避障

任务完成效率
随数据量增加，DT辅助TD3保持较短任务时间

离线虚拟训练减少真实试错需求，在线环境更新与动作预检提高决策安全性，轨迹优化提升任务效率

PART 03

信道地图孪生构建与网络优化



面向低空信息网络的信道地图孪生构建与应用

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 从“统计信道”走向“环境特定信道知识”

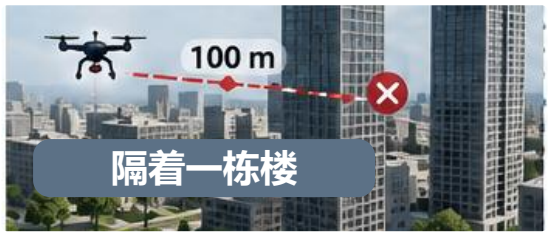
➢ 传统统计信道模型主要描述**一般传播规律**，难以反映具体建筑环境中的**精细空间差异**；低空数字孪生需要能够预测**特定环境、位置及网络配置**下传播特性的信道知识地图（CKM）。

传统无线网络：基于统计信道模型的优化

一般化信道，难以刻画具体环境的差异

位置 / 距离 → 统计模型 → SNR / 速率 → 网络优化

面临挑战



信道质量差



信道质量好

数字孪生需要：环境特定的信道知识

预测具体环境下的位置相关信道特征

三维环境 + 收发机位置 + 收发机配置 → 环境特定信道



为每个位置生成环境特定的高保真信道，实现低开销、高精度的信道获取

面向低空经济的信道孪生构建与应用

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 技术演进路线与代表性工作

输入：已知物理环境



- 建筑/地形/道路/基站位置
- 基站天线参数与频段
- 无人机高度范围/飞行区域

CKM 能力

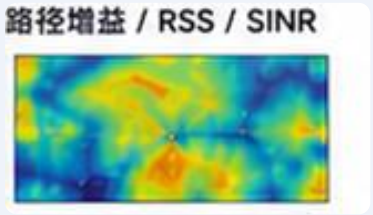
- 传播特性预测
- 干扰预测
- 位置梯度
- 波束效果预测

网络应用

轨迹优化	波束优化	基站切换
• 可微梯度信息 • 联合功率/轨迹优化	• 连续波束搜索 • 低导频开销预测	• 多基站虚拟评估 • 最优切换时机与目标

① 2D 信道知识地图

地面覆盖

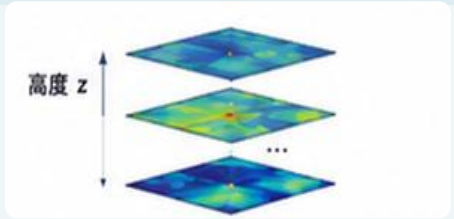


- 路损 / RSS / SINR
- 深度学习：CNN、UNet、GAN、Diffusion

基础 CKM 构建方法（多篇）

② 3D 信道知识地图

从二维走向三维低空

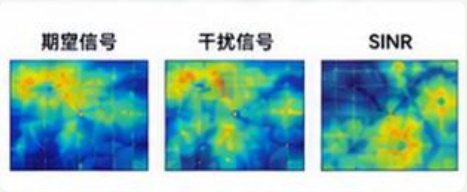


- 融合环境拓扑与高度先验
- 低采样/零采样三维信道地图重构

3D-RadioDiff (WCL 2025)

③ 干扰感知 CKM

从期望信号到全环境感知

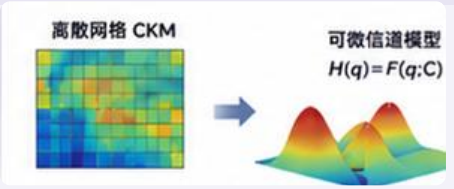


- 融合环境拓扑与接收测量
- 重构未知外源干扰分布，支持SINR预测

IMNet (WCL 2025)

④ 可微 CKM

从离散地图到连续可微

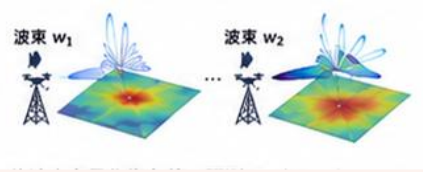


- 基于 KAN/cKAN 构建连续可微信道模型
- 提供梯度信息，支持轨迹/资源联合优化

Differentiable (WCSP 2025, IoTJ 2026)

⑤ 面向波束赋形的 CKM

从静态环境到动作感知



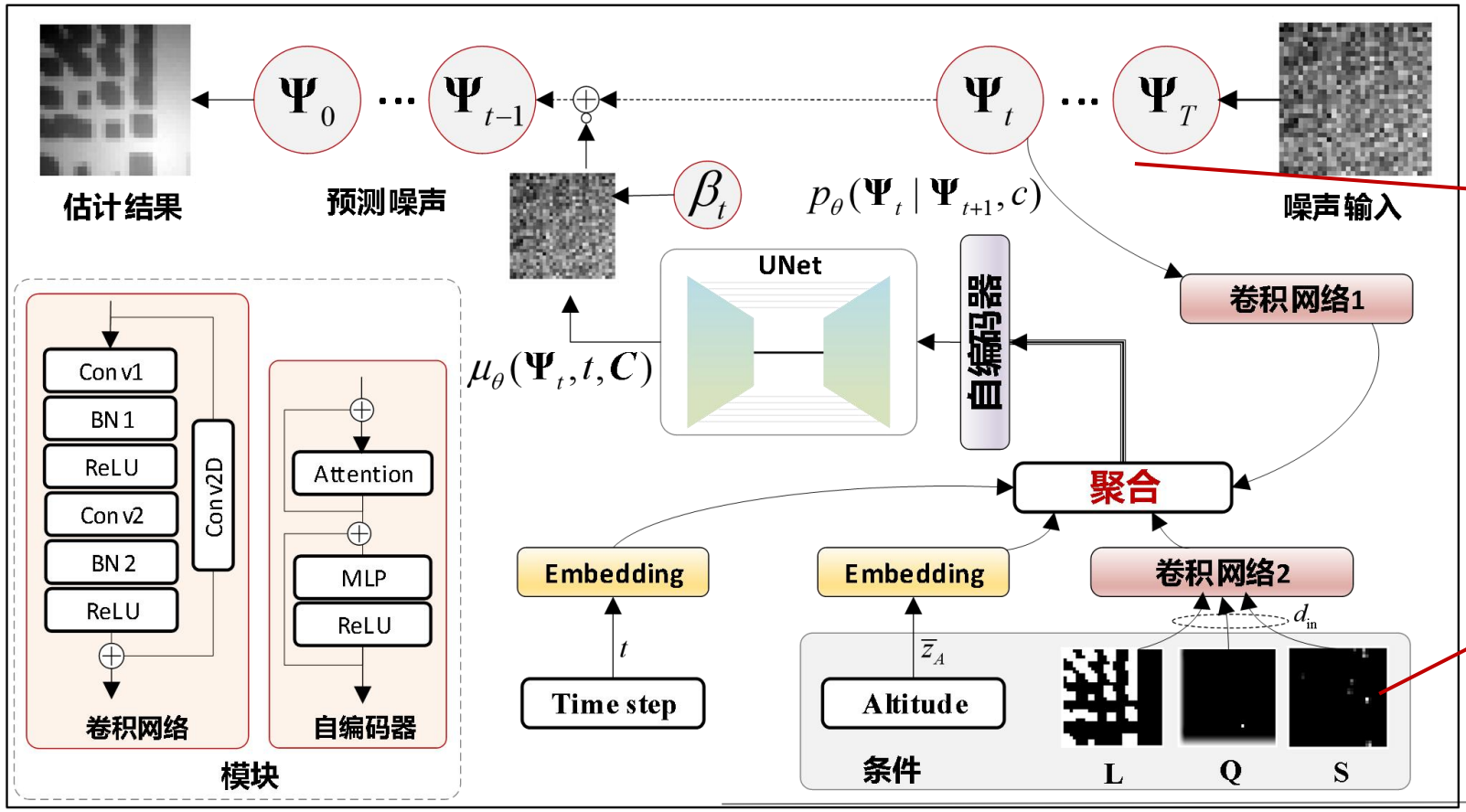
- 将波束向量作为条件，预测不同位置波束功率
- 支持波束预测、优化与切换

BeamCKMDiff (INFOCOM2026, JSTSP 2026)

基于条件扩散模型的三维信道地图构建

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

- **研究问题**： 低空信道具有明显的高度依赖性，逐高度开展**射线追踪计算成本较高**，而传统数据驱动方法通常依赖**较多目标场景测量样本**。
- **解决思路**： 将**环境拓扑与高度作为条件**，利用**扩散模型**学习**三维传播分布**，实现不同高度下的信道地图重构。



- **环境条件**： 利用建筑拓扑等信息表征传播环境
- **高度条件**： 引入目标高度，学习不同高度的传播差异
- **条件生成**： 通过扩散模型生成对应高度的信道地图

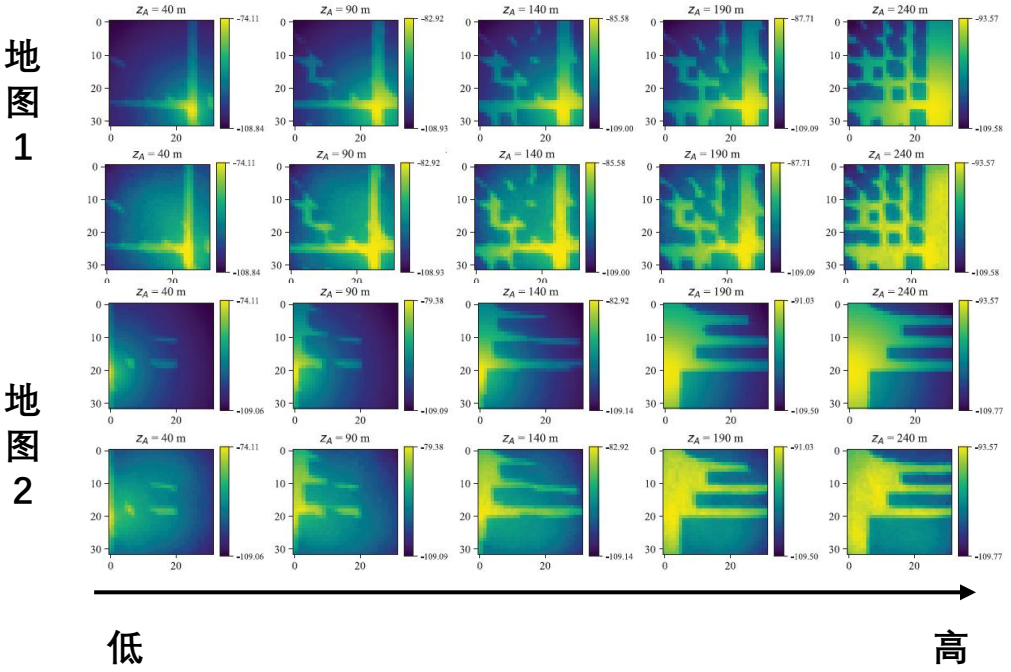
[5] L. Zhao, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "3D-RadioDiff: An Altitude-Conditioned Diffusion Model for 3D Radio Map Construction," IEEE Wireless Commun. Letters, vol. 14, no. 7, pp. 1969-1973, July 2025.

基于条件扩散模型的三维信道地图构建

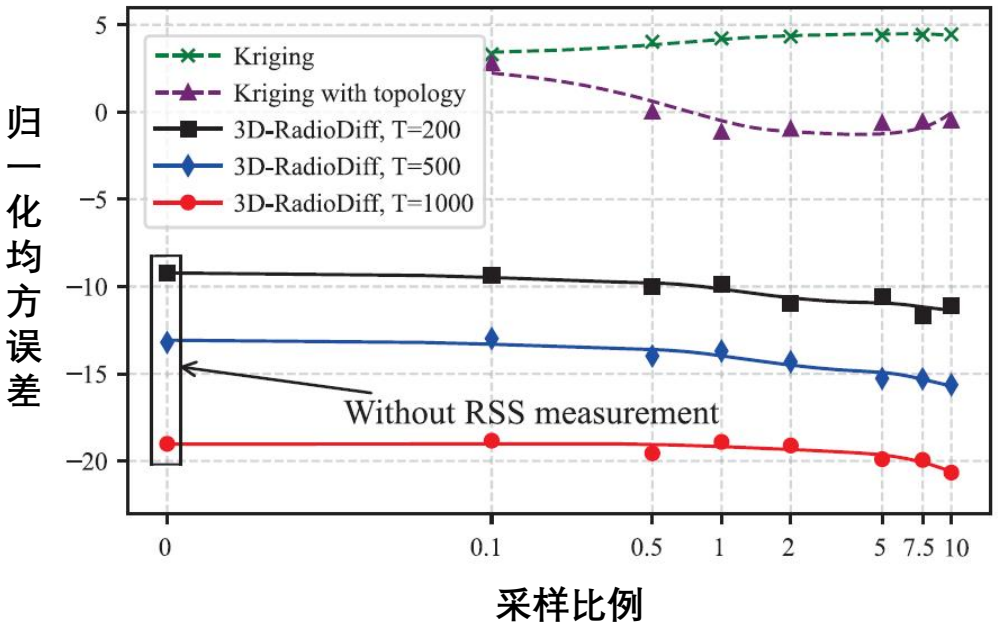
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 仿真验证

- **重构效果**： 模型能够重构**不同高度下的接收功率分布**，并反映建筑遮挡引起的空间变化。
- 相比传统方法，归一化均方误差**改善超过10 dB**，并验证了目标场景**无需额外RSS采样**的重构能力。



不同高度下的信道地图重构效果



不同采样比例下的重构误差比较

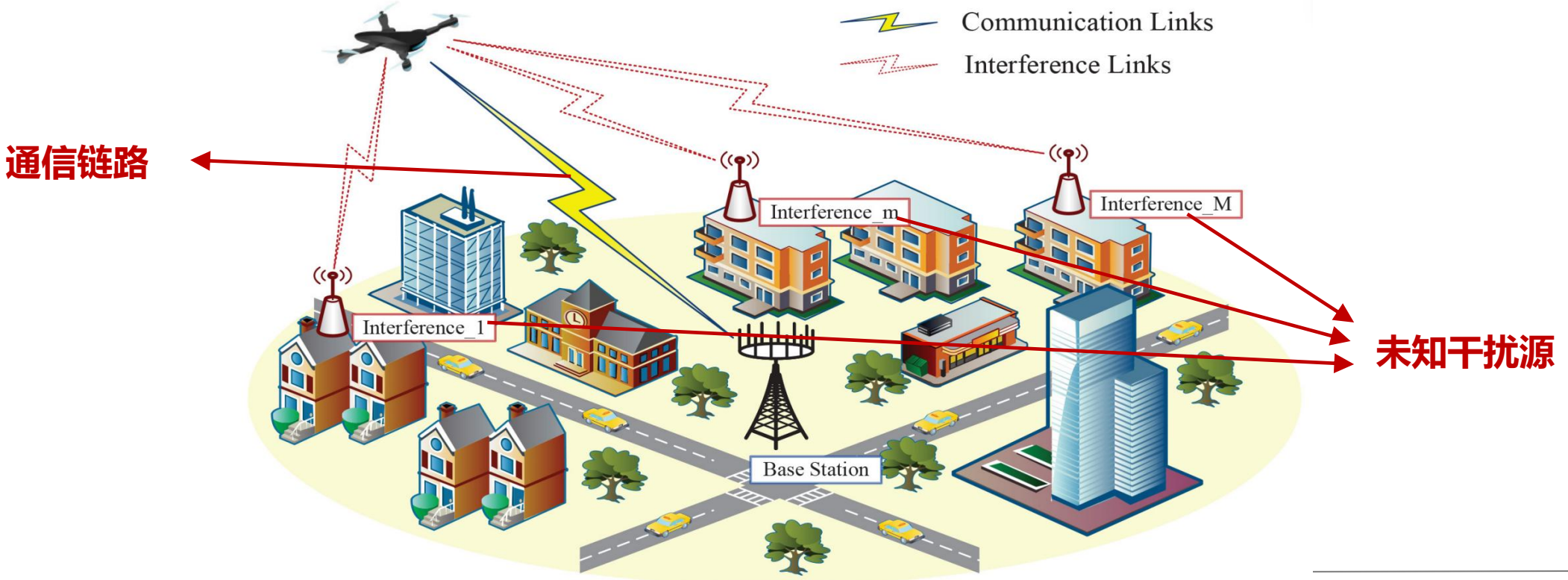
为低空数字孪生提供不同高度下的信道先验，减少实际场景的采样需求

外源干扰感知的信道地图构建

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

研究动机

- 实际通信质量不仅取决于**期望信号**接收功率，还受到**外源干扰**与噪声的共同影响。
- 传统CKM主要刻画期望通信链路的传播特性，难以准确预测存在**未知干扰**时的SINR分布。
- 非合作干扰源的位置、发射参数和传播条件往往未知，需要利用有限测量与环境先验重构其空间影响。



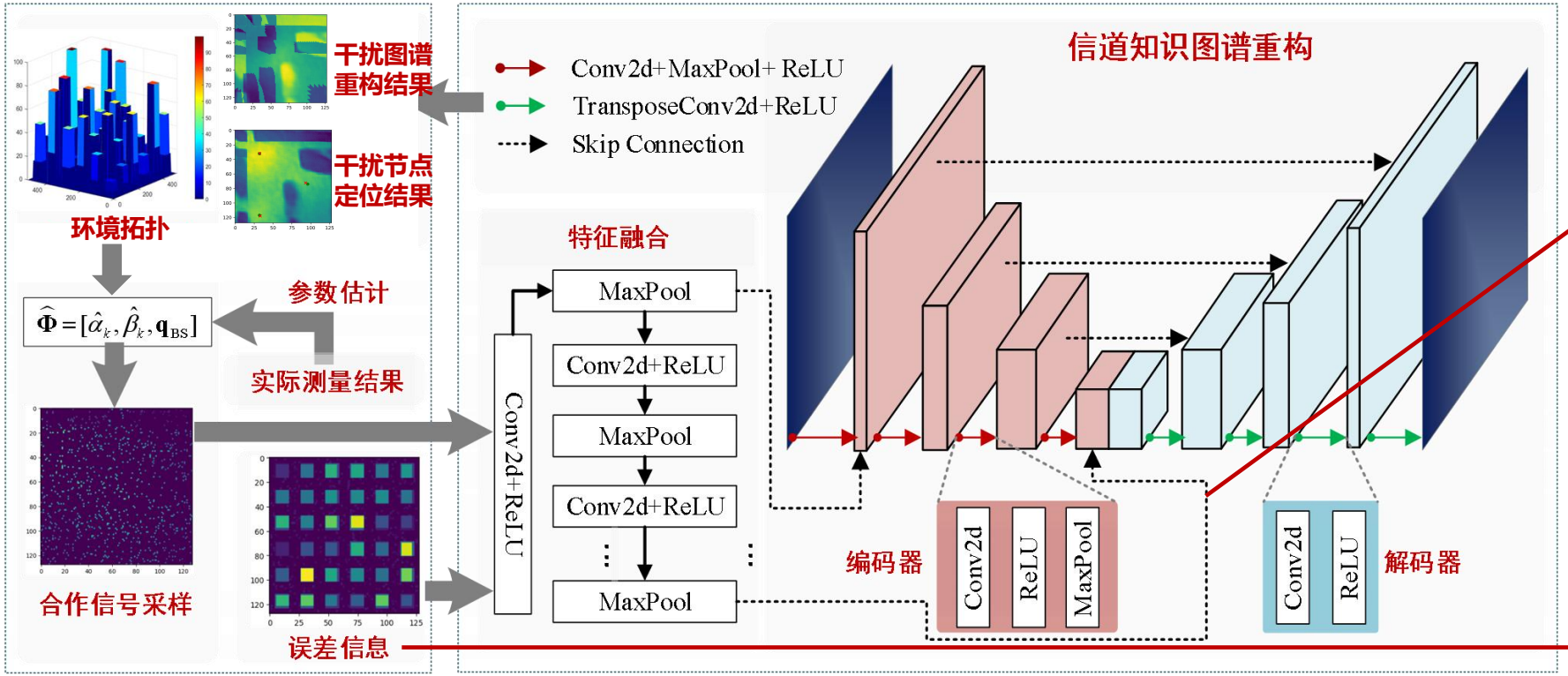
[6] L. Zhao, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "IMNet: Interference-Aware Channel Knowledge Map Construction and Localization," IEEE Wireless Commun. Letters, vol. 14, no. 3, pp. 856-860, March 2025.

外源干扰感知的信道地图构建

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

解决思路

- **期望信号预测**：利用**环境拓扑**和**已知通信链路参数**，构建期望信号的接收功率分布。
- **干扰分布重构**：联合**含干扰的接收测量**与**期望信号预测结果**，估计未知外源干扰在空间中的分布。
- **通信质量评估**：基于期望信号和干扰功率地图构建**SINR地图**，为干扰环境下的通信性能预测提供依据。



环境先验辅助

利用已知传播环境降低干扰重构的不确定性

物理合理性约束

通过非负校正抑制不合理的干扰功率估计

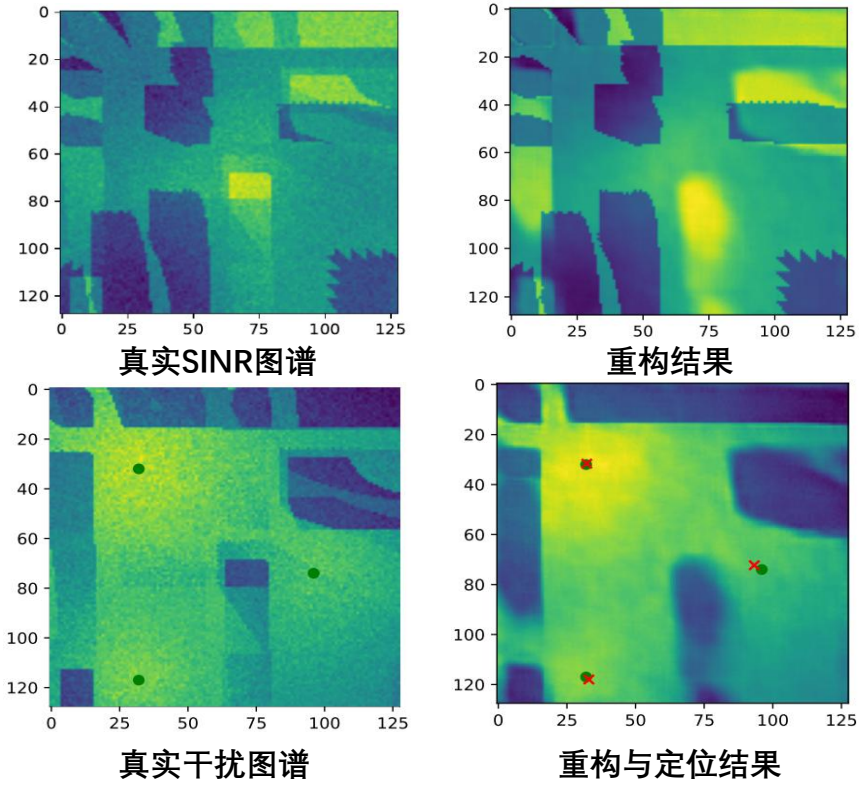
[6] L. Zhao, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "IMNet: Interference-Aware Channel Knowledge Map Construction and Localization," IEEE Wireless Commun. Letters, vol. 14, no. 3, pp. 856-860, March 2025.

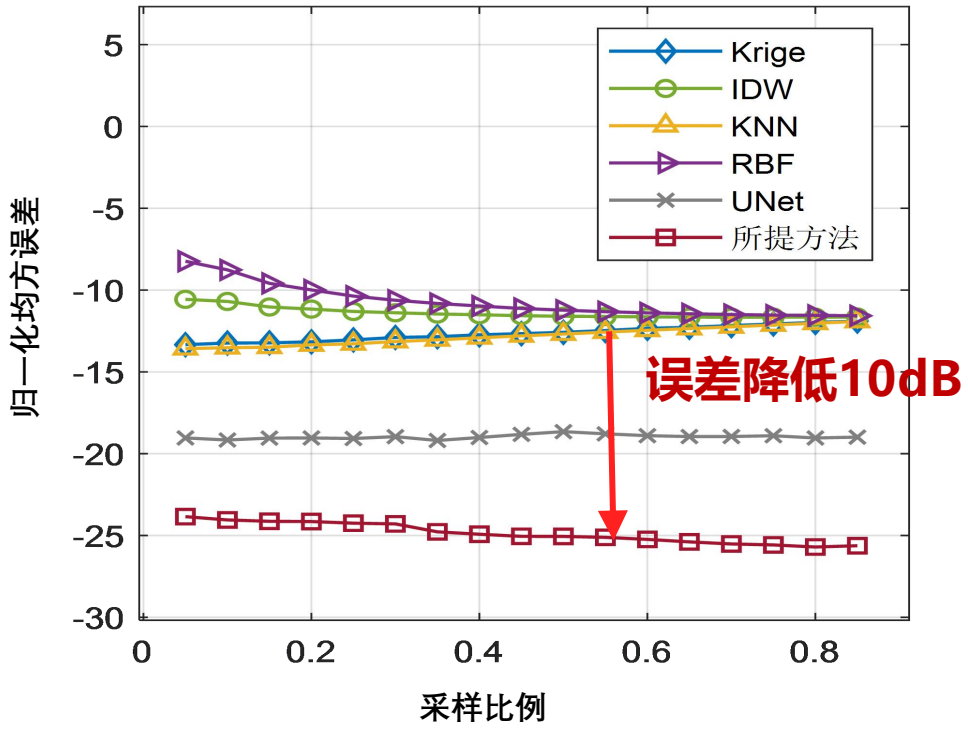
外源干扰感知的信道地图构建

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

仿真验证

- **重构精度**： 所提方法的干扰地图重构**NMSE可低于−20 dB;**
- **对比结果**： 相较于**传统插值方法**，NMSE改善**超过10 dB**；相较于**神经网络基线，改善超过5 dB。**





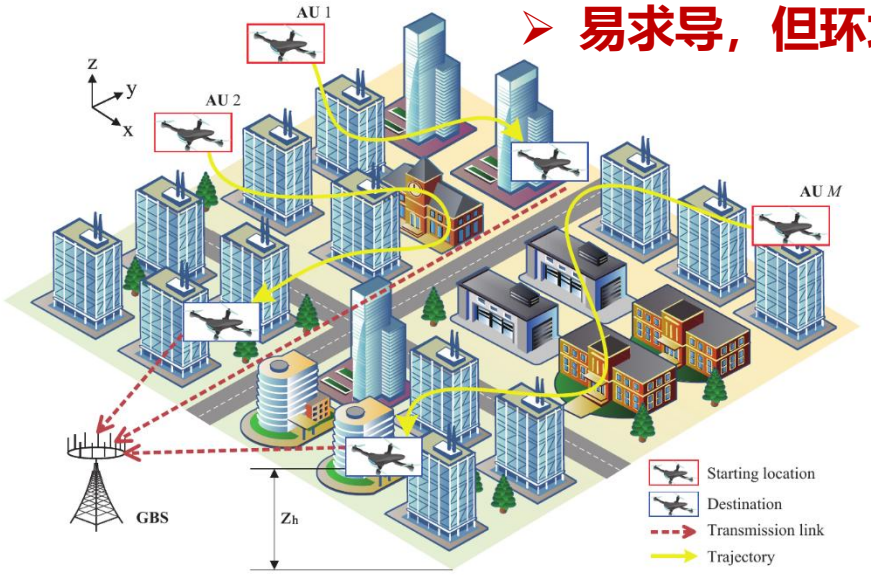
将未知外源干扰纳入信道孪生，同时预测期望信号与干扰分布，为SINR评估提供更完整的环境知识

融合环境拓扑的可微信道地图构建与轨迹设计

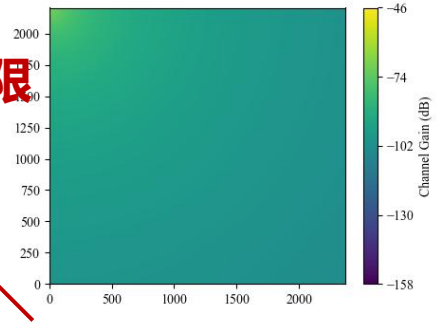
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

研究动机

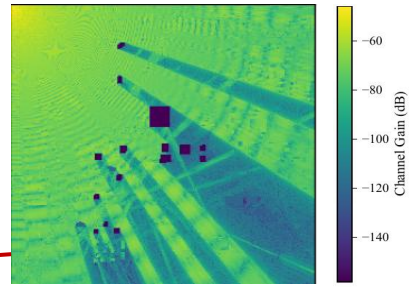
- 低空无人机轨迹优化需要预测不同位置的通信质量，并判断**位置变化**对通信性能的影响。
- 基于**栅格图像输出**的信道地图能够表征复杂环境，但通常难以直接提供连续位置上的**可用梯度**。
- **传统解析信道模型**便于求导，却难以充分反映**建筑遮挡**与**复杂传播**，因此需要兼顾预测精度和位置可微性。



➢ **易求导，但环境刻画有限**



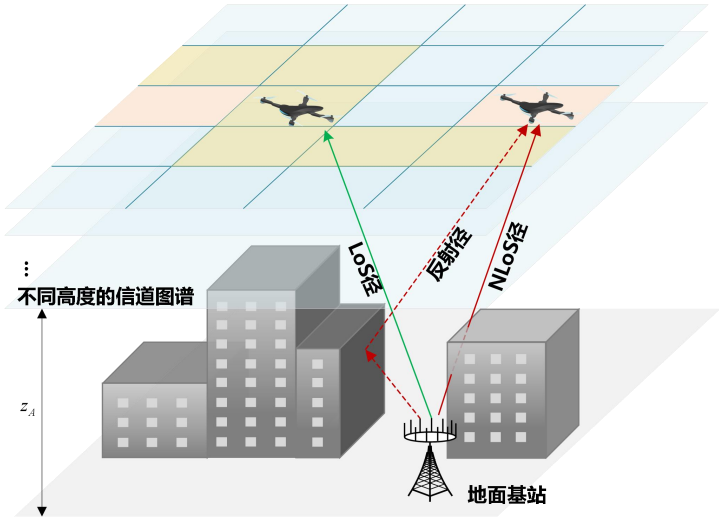
传统信道模型



离散信道地图

➢ **空间预测精细，但连续梯度不易获得**

➢ **目标：环境特定且关于位置可微**



关于位置离散的信道输入

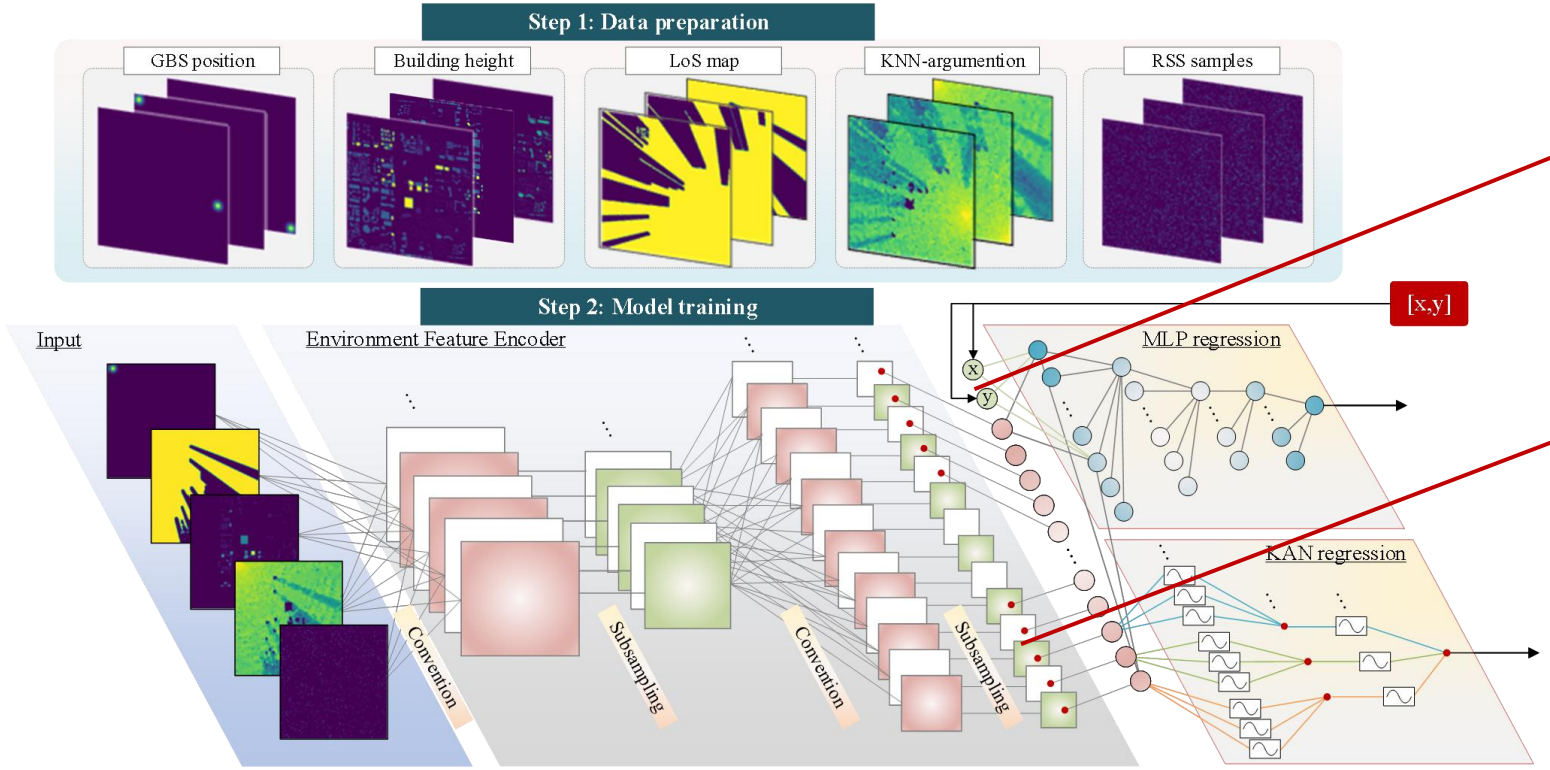
[7] L. Zhao, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "Towards Intelligent Low-Altitude Wireless Network Deployment: Differentiable Channel Knowledge Map Construction and Trajectory Design," IEEE Internet of Things Journal, 2026.

融合环境拓扑的可微信道地图构建与轨迹设计

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 解决思路

➢ 融合**建筑拓扑**、**基站位置**、**LoS分布**、**部分信道采样**及**插值地图**等辅助信息，将连续空间坐标作为显式输入，构建关于位置可微的信道预测模型。



➢ 位置坐标支路： 将无人机连续三维位置输入回归网络，预测对应位置的信道增益。

➢ 环境特征支路： 编码建筑拓扑、基站位置及相关传播先验，提取场景相关特征。

➢ 输出：信道增益预测 + 位置梯度

$$\hat{g}(\mathbf{q}) = F_\theta(\mathbf{q}, \mathcal{E}) \qquad \nabla_{\mathbf{q}}\hat{g}(\mathbf{q})$$

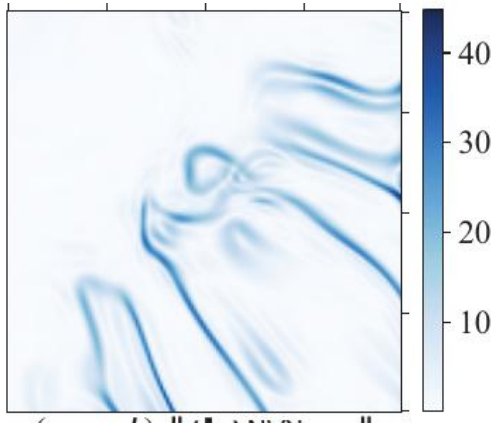
[7] L. Zhao, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "Towards Intelligent Low-Altitude Wireless Network Deployment: Differentiable Channel Knowledge Map Construction and Trajectory Design," IEEE Internet of Things Journal, 2026.

融合环境拓扑的可微信道地图构建与轨迹设计

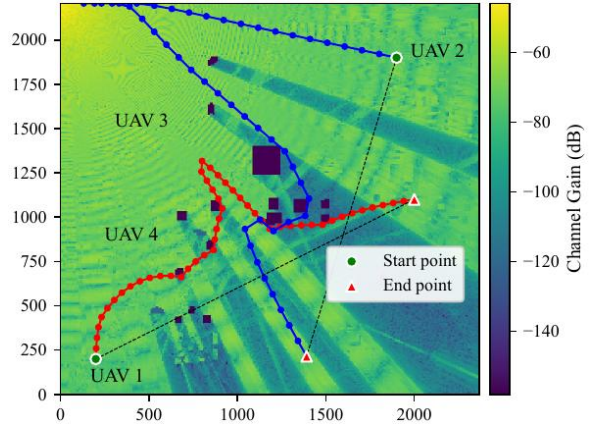
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

仿真验证

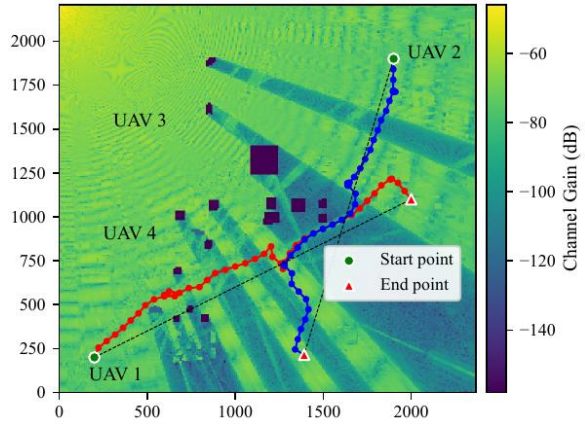
- **可微性验证**： 所构建模型能够计算信道增益关于空间位置的梯度，为连续轨迹优化提供方向信息。
- **建模精度**： 融合环境拓扑的信道预测模型能够更好地反映具体场景中的传播变化。
- **轨迹优化性能**：对比基于**统计信道模型**优化方案，基于**可微CKM**优化得到的平均通信速率**提升30%以上**



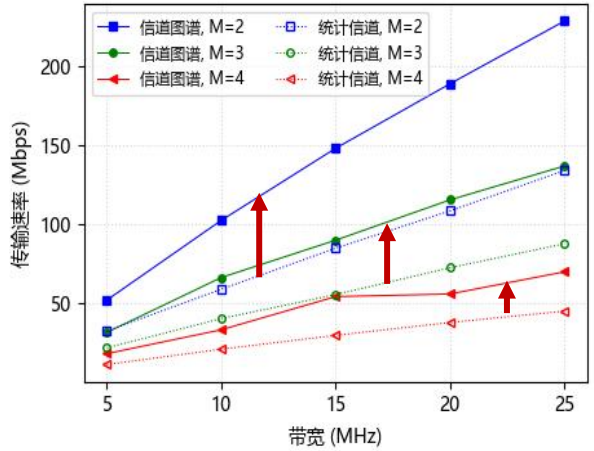
位置梯度分布



基于统计信道模型的轨迹



基于可微CKM的轨迹



平均通信速率对比

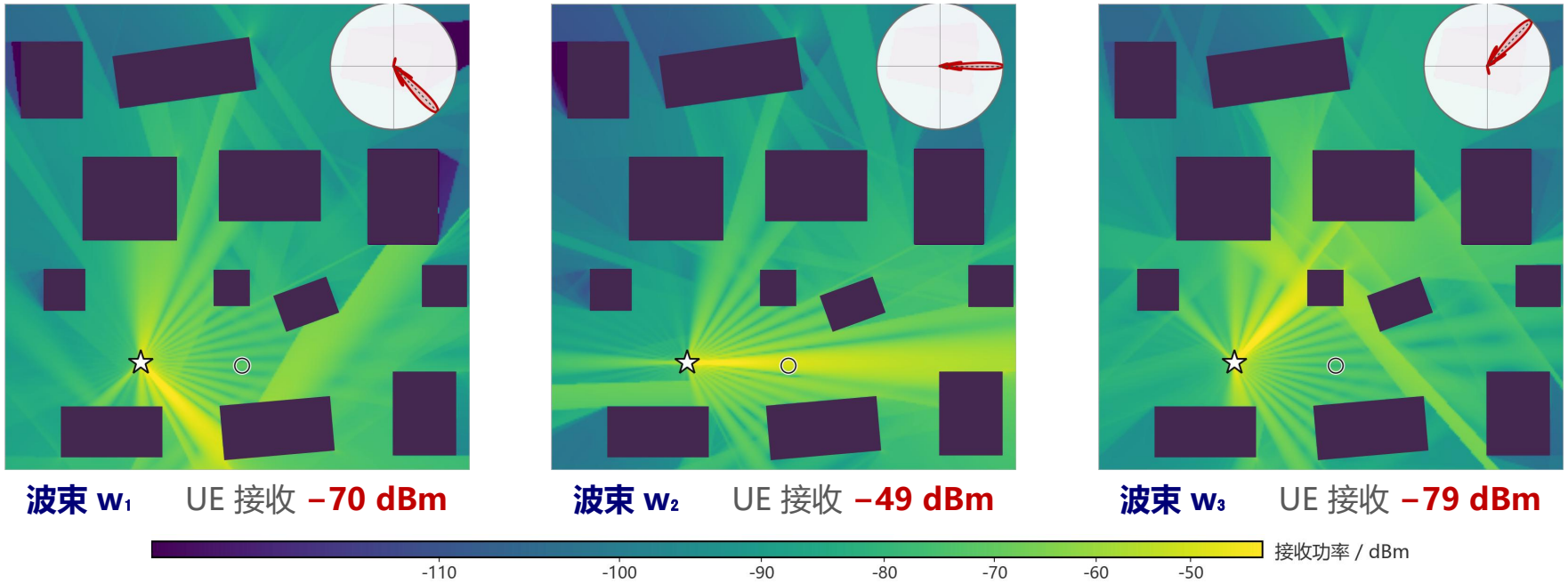
可微CKM不仅可预测某个位置的信道，还能够利用位置梯度指导无人机向通信条件更优的区域移动

面向多天线系统的波束条件信道地图构建

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

研究动机

- 在**频段**和**天线配置**固定时，传统CKM通常重点建模环境与收发位置之间的传播关系。
- 对于多天线系统，即使环境和用户位置不变，不同**发射波束**也可能产生显著不同的**接收功率分布**。
- 需要将波束配置引入CKM，使数字孪生能够预测不同**波束动作**对**无线传播性能**的影响。



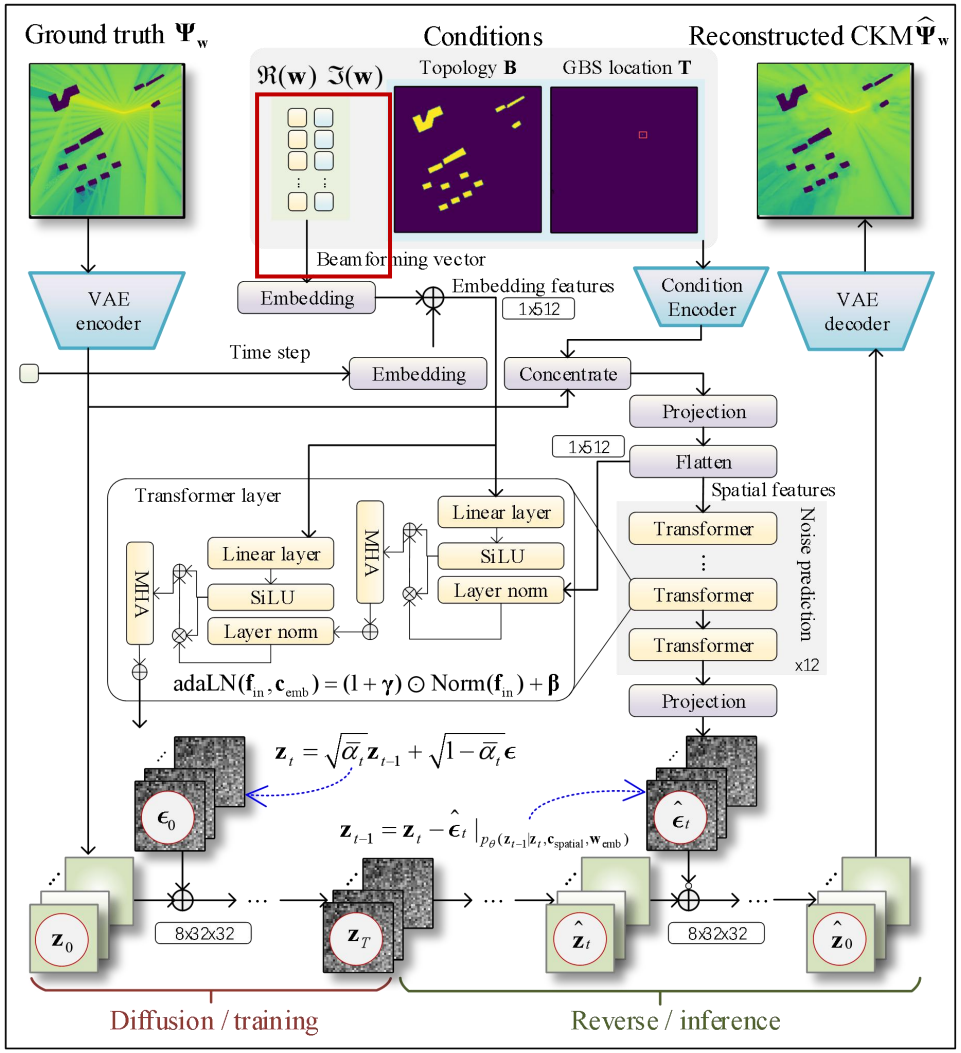
[8] L. Zhao, Y. Wang, **X. Wang***, Z. Fei and Y. Zeng, "BeamCKMDiff: Beam-Aware Channel Knowledge Map Construction via Diffusion Transformer," IEEE INFOCOM 2026 - IEEE Conference on Computer Communications, Tokyo, Japan, 2026, pp. 1-6.

面向多天线系统的波束条件信道地图构建

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

解决思路

- **环境条件编码**：融合建筑拓扑与基站位置，提取环境相关的传播特征。
- **连续波束条件输入**：将波束赋形向量作为**显式条件**，使模型能够区分不同发射波束对应的信道分布。
- **条件扩散生成**：通过DiT与条件调制机制学习**环境**、**波束**和**接收功率地图**之间的关系。
- **目标场景信道预测**：给定环境和波束条件，预测接收功率分布，支持目标场景无需额外RSS测量的地图生成。



[8] L. Zhao, Y. Wang, **X. Wang***, Z. Fei and Y. Zeng, "BeamCKMDiff: Beam-Aware Channel Knowledge Map Construction via Diffusion Transformer," IEEE INFOCOM 2026 - IEEE Conference on Computer Communications, Tokyo, Japan, 2026, pp. 1-6.

面向多天线系统的波束条件信道地图构建

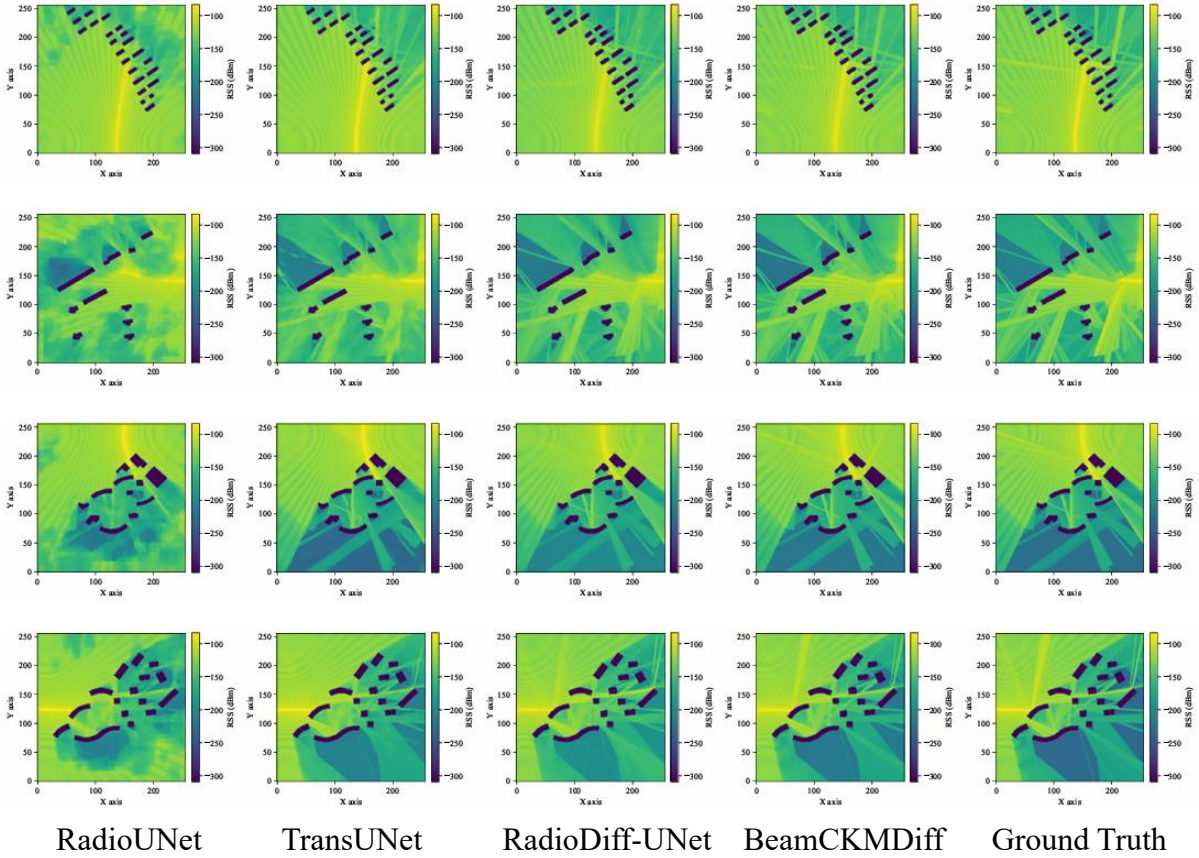
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 仿真验证

- 基于**OpenStreetMap** + **Sionna** 射线追踪构建数据集，覆盖30个城市区域；每个区域512m×512m，分辨率**2m**
- 基站采用32单元均匀线阵，设置不同基站位置和波束条件，测试未见波束及未见位置下的预测性能。
- 对比方法：**RadioUNet**、**TransUNet**、**RadioDiff-UNet**

Methods	Unseen beams	Unseen locations	Inference time
RadioUNet	-16.35 dB	-16.34 dB	**0.231** s
TransUNet	-18.91 dB	-17.34 dB	0.234 s
RadioDiffUNet	-19.49 dB	-19.13 dB	0.373 s
Beam-CKMDiff	**-21.24 dB**	**-20.68 dB**	0.688 s

BeamCKMDiff在未见波束和未见位置测试中取得**最低NMSE**，但推理时间高于对比方法



实现不同波束下接收功率分布的预测，为数字空间中的波束评估提供基础

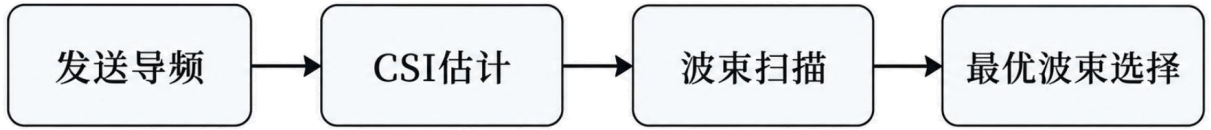
基于信道孪生的智能波束管理

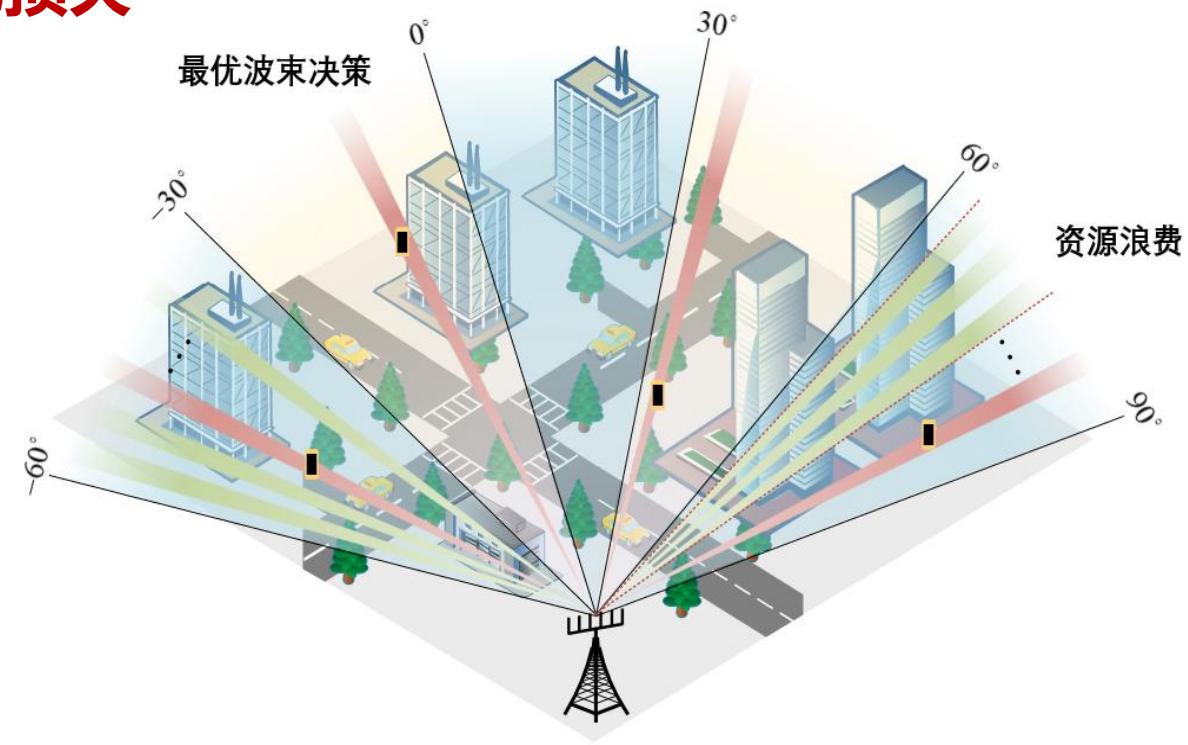
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 研究动机：波束扫描开销与离散码本量化损失

现有的5G NR多阶段波束训练协议中，波束细化（P2）阶段存在两个明显的瓶颈：

- **扫描开销**：当用户集中在局部空间区域时，**均匀扫描**可能产生不必要的**参考信号开销**；
- **码本限制**： 固定离散码本的候选方向和波束宽度有限，可能难以适应复杂传播环境和用户空间分布。



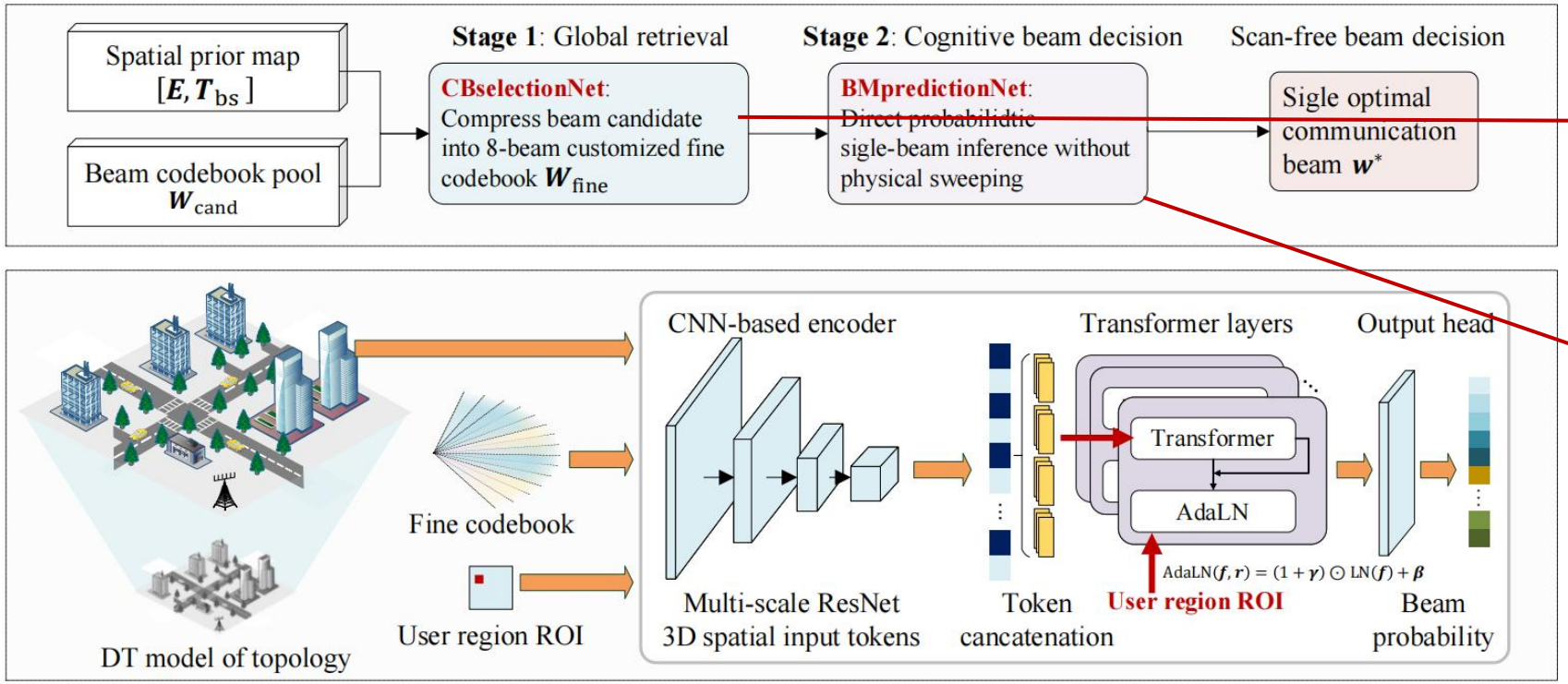


研究思路：利用信道孪生提前评估候选波束，构建场景细化码本，减少P2波束细化阶段的实际扫描。

基于信道孪生的智能波束管理

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

- **面向场景的定制细化码本：**融合环境拓扑和用户空间区域信息，利用**信道孪生**预测不同候选波束的通信效果，**构建适应目标场景的细化码本。**
- **面向用户位置的免扫描选择：**利用用户区域信息引导波束预测网络，直接选择候选细化波束，减少P2阶段对候选波束的逐一扫描。



定制码本网络

基于环境拓扑+用户区域输出场景适配细化码本

波束预测网络

基于用户位置/区域特征输出细化波束选择

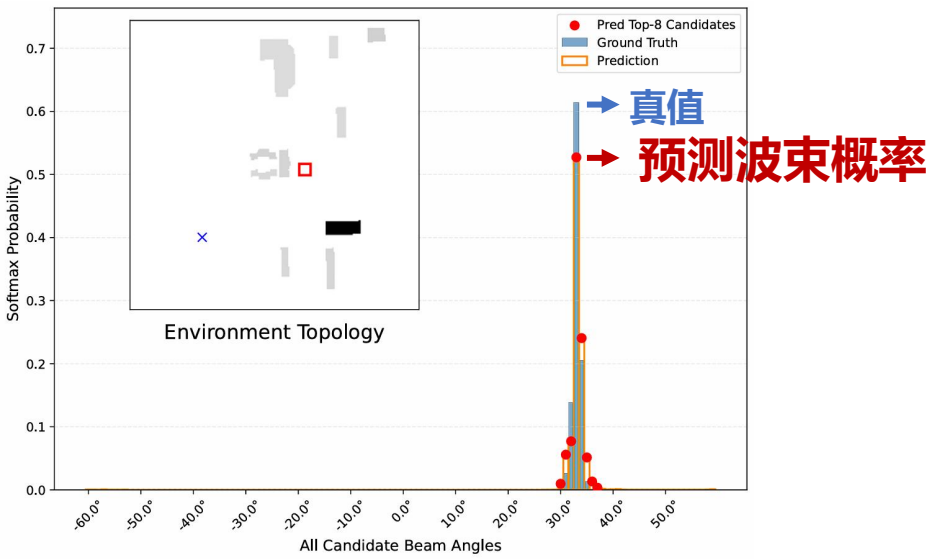
[9] L. Zhao, Q. Liu, **X. Wang***, et al, “Digital Twin-Driven Beam Refinement: Customized Codebook Construction and Scan-Free Decision" accepted by IEEE Globecom 2026.

基于信道孪生的智能波束管理

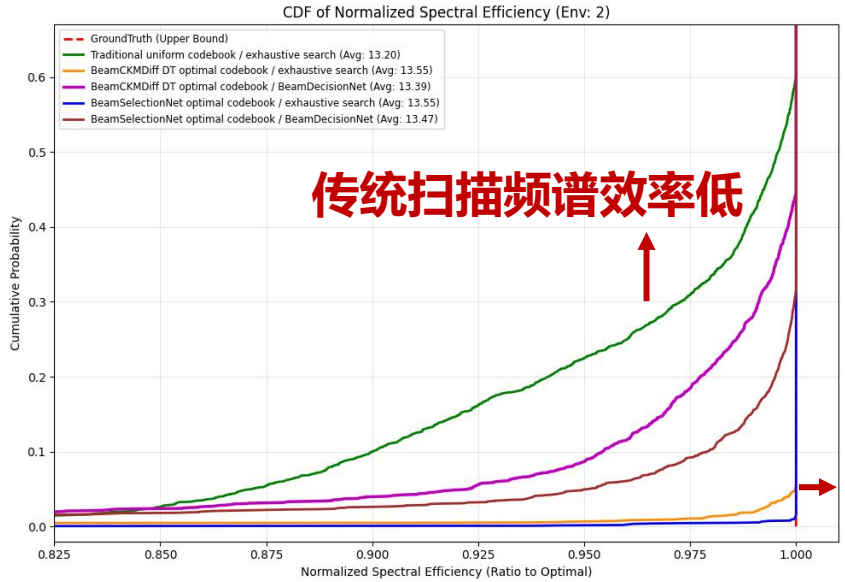
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

仿真验证

- **波束预测性能**： 模型能够学习用户区域与候选波束之间的对应关系，输出波束选择概率分布。
- **频谱效率**：系统归一化频谱效率**显著优于**传统均匀扫描基线，逼近完美 CSI 下的参考性能上界。
- **测量开销**： 通过预测方式选择P2阶段的候选细化波束，减少逐一扫描带来的**测量时间**和**参考信号开销**。



波束选择概率预测



不同波束管理方案的归一化频谱效率

利用信道孪生实现智能码本选择与预测式波束选择，以较低的P2扫描开销获得较好的通信性能

环境感知的连续波束赋形预测

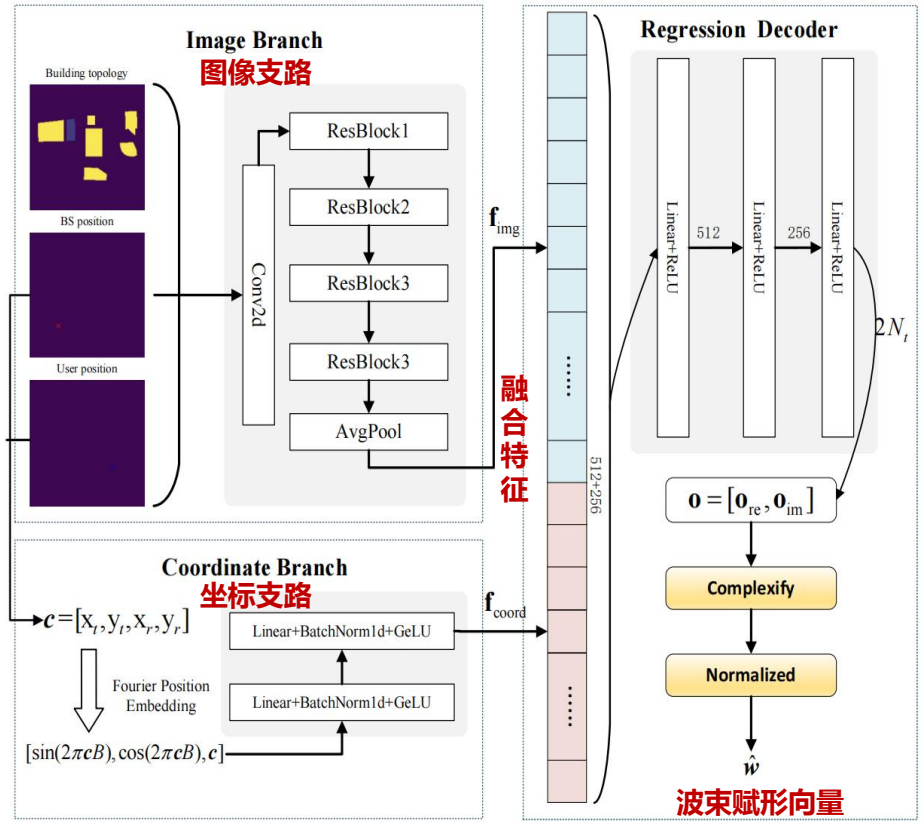
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

研究动机

- 离散码本将波束选择限制在预定义候选集合内，可能产生**方向量化损失**；
- 利用环境与位置先验**直接预测连续波束赋形向量**，可获得更精细的波束配置。

解决思路

- 利用建筑环境拓扑及收发端位置信息，建立从**环境与空间位置**到**连续波束赋形向量**的映射模型，直接预测适应当前传播环境的波束赋形向量
- **环境特征提取**： 利用ResNet提取建筑分布及空间几何特征
- **坐标特征编码**： 利用傅里叶特征编码增强连续位置表征
- **波束向量预测**： 融合环境与位置特征，通过回归网络输出归一化波束赋形向量



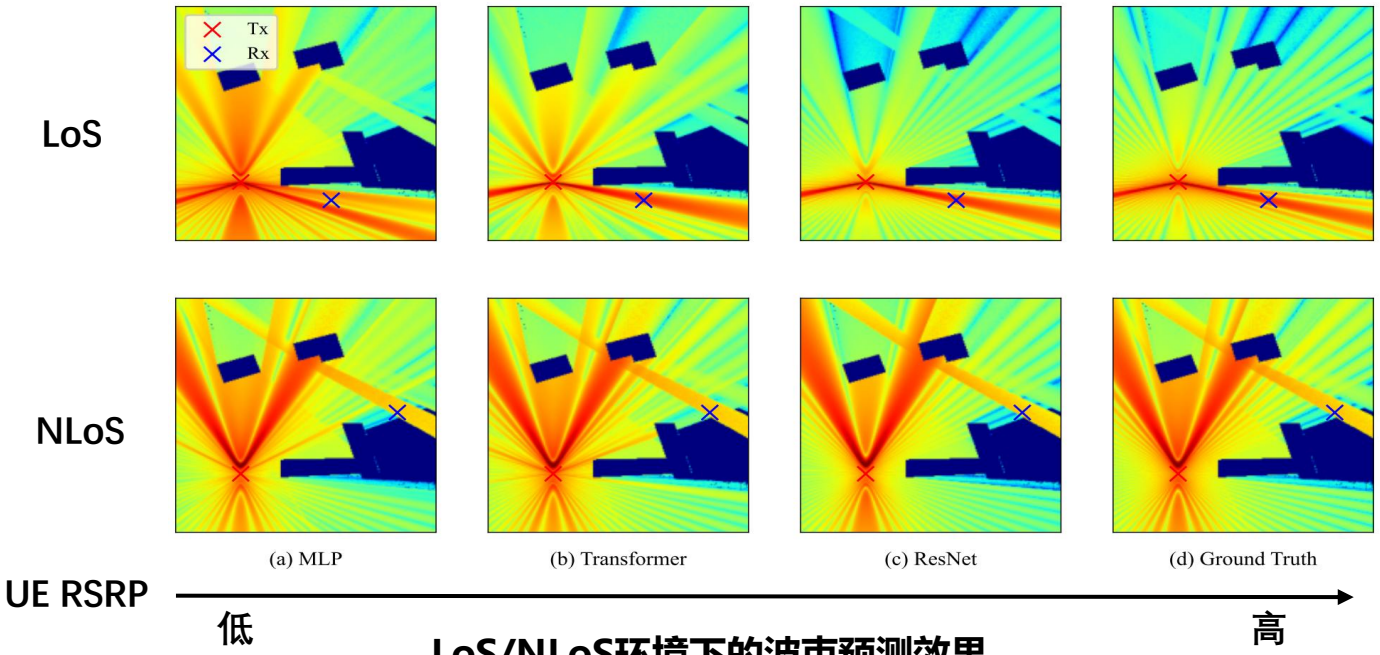
[10] Y. Wang, Z. Fei, **X. Wang***, et al., “Environment-Aware Beamforming Prediction: A CKM-Inspired Approach," IEEE Wireless Commun. Lett., 2026.

环境感知的连续波束赋形预测

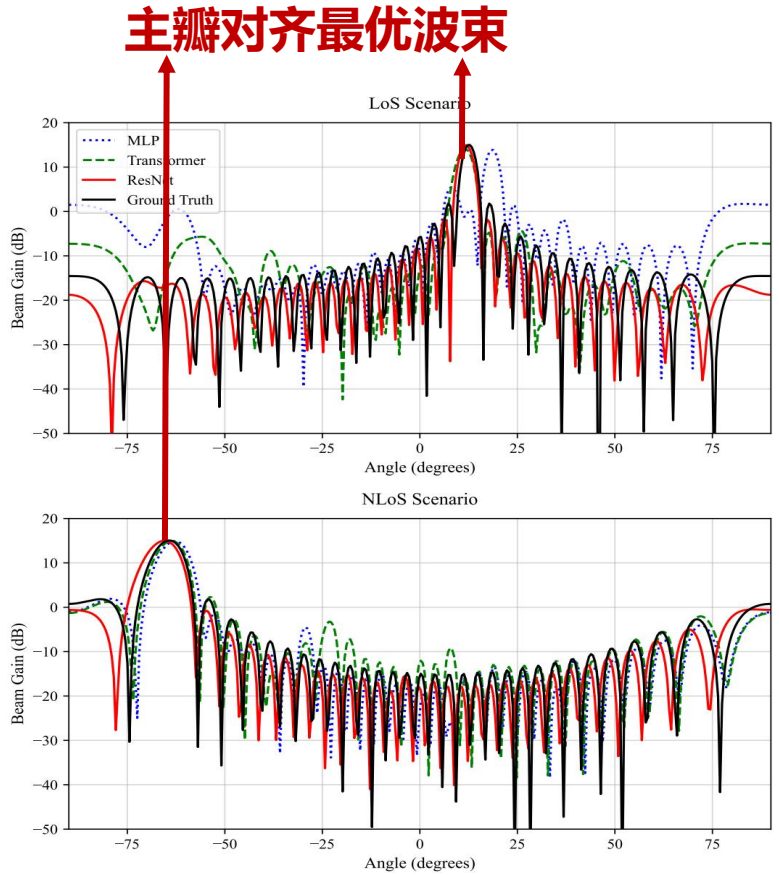
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

仿真验证

- 分别在LoS与NLoS场景中，基于**MLP**、**Transformer**与**ResNet**等网络结构进行连续波束向量预测，并比较预测误差。
- ResNet网络实现归一化均方误差**最小**的**波束赋形**预测



LoS/NLoS环境下的波束预测效果



波束增益对比

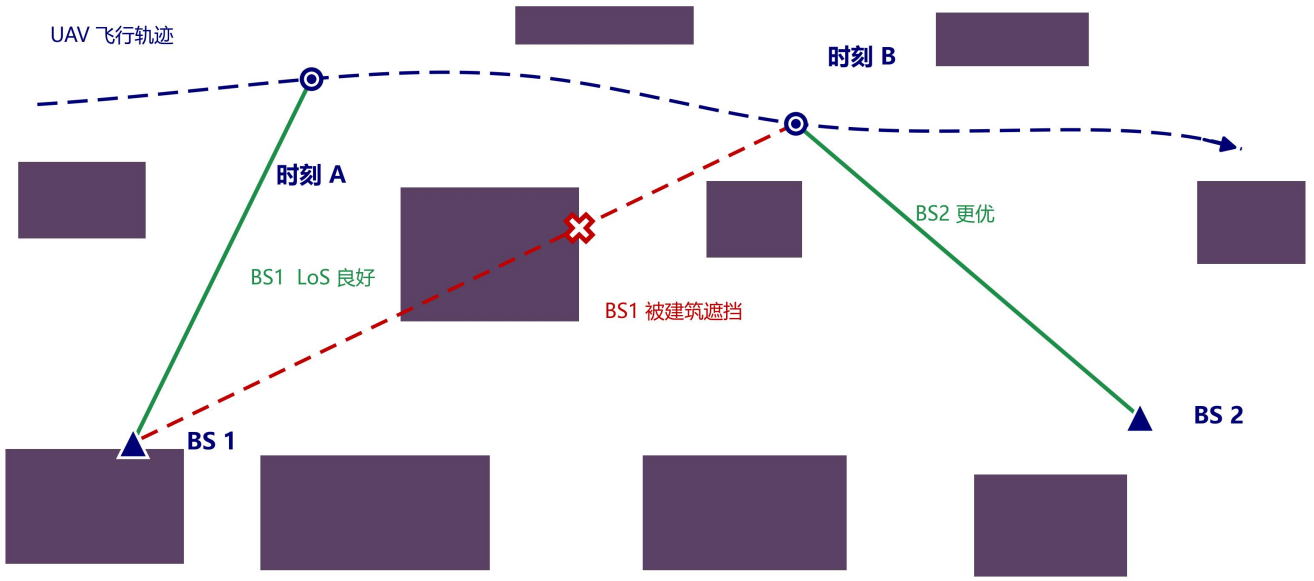
利用环境与位置先验直接预测连续波束赋形向量，为低空网络提供低测量开销的波束配置方法

多基站协同的波束与切换决策

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

研究动机

- 波束条件CKM主要研究**服务基站已确定**时的波束优化，解决“**当前基站采用哪个波束**”的问题。
- 低空移动中，**建筑遮挡**可能导致当前服务基站的**链路质量显著下降**，此时仅优化当前基站波束难以维持可靠连接
- 基站选择与波束配置**相互耦合**，需要比较**不同候选基站**在**优化波束**条件下的通信效果；频繁测量增加测量开销，导致决策滞后。



波束选好了，基站选对了吗？ —— 从单站波束优化走向多站联合决策

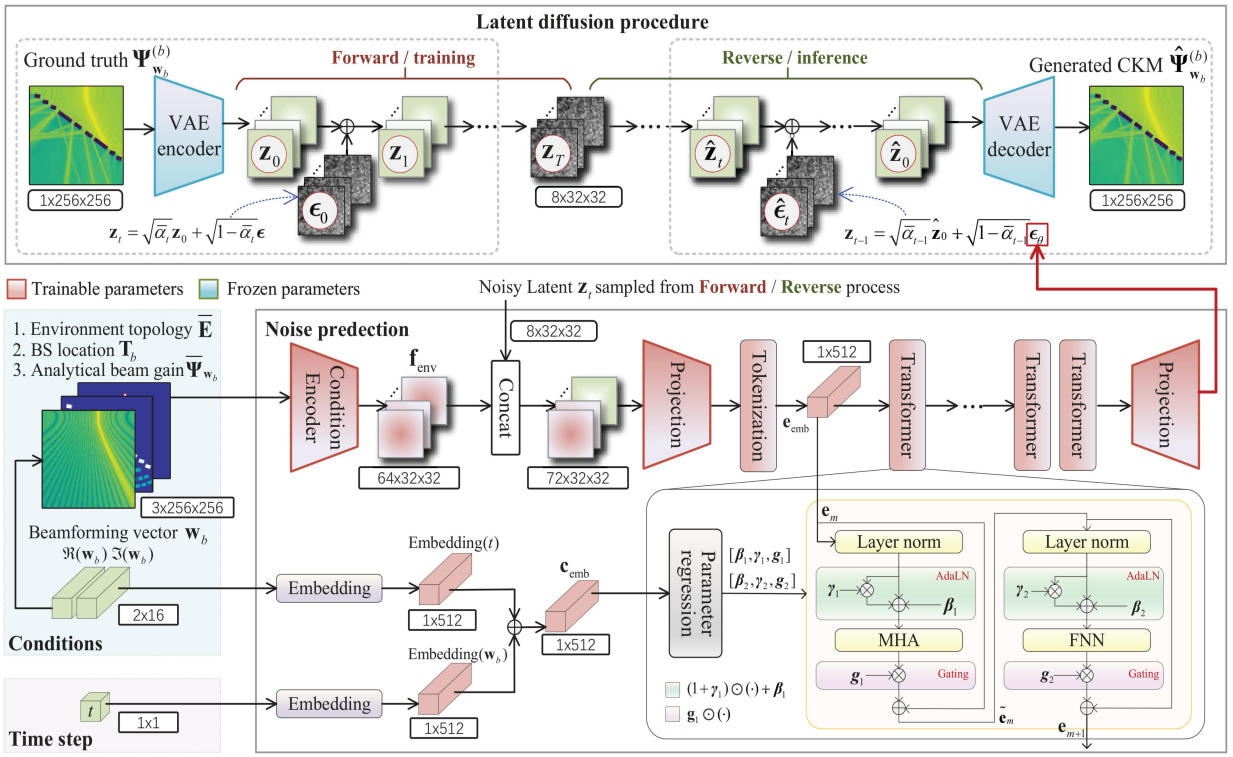
[11] L. Zhao, Z. Fei, **X. Wang***, et al., “Intelligent Beamforming and Handover via Physics-Informed Beam-Aware CKM Diffusion,” accepted by IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2026. Available： https://arxiv.org/abs/2609.34704

多基站协同的波束与切换决策

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

● 解决思路

- 利用候选基站波束条件CKM，在**数字空间预测并优化**不同基站的波束配置，**比较候选链路质量**，为基站选择与切换提供决策依据。
- **决策流程**：UAV位置与环境信息 → 候选基站CKM → 连续波束优化 → 候选链路比较 → 基站与波束联合决策



① 连续波束条件建模

利用adaLN将连续波束向量注入DiT，实现不同波束配置下的信道地图预测。

作用： 不局限于预设离散码本，可进一步优化连续波束配置。

② 物理先验与数据驱动融合

利用阵列流形构造LoS方向性增益先验，再通过扩散模型学习复杂传播环境中的剩余特征。

作用： 将解析传播知识与数据驱动预测相结合。

③ 可微生成与波束优化

利用可微的反向扩散过程计算目标函数关于连续波束向量的梯度。

作用： 使波束条件CKM由预测模型进一步成为连续波束优化工具。

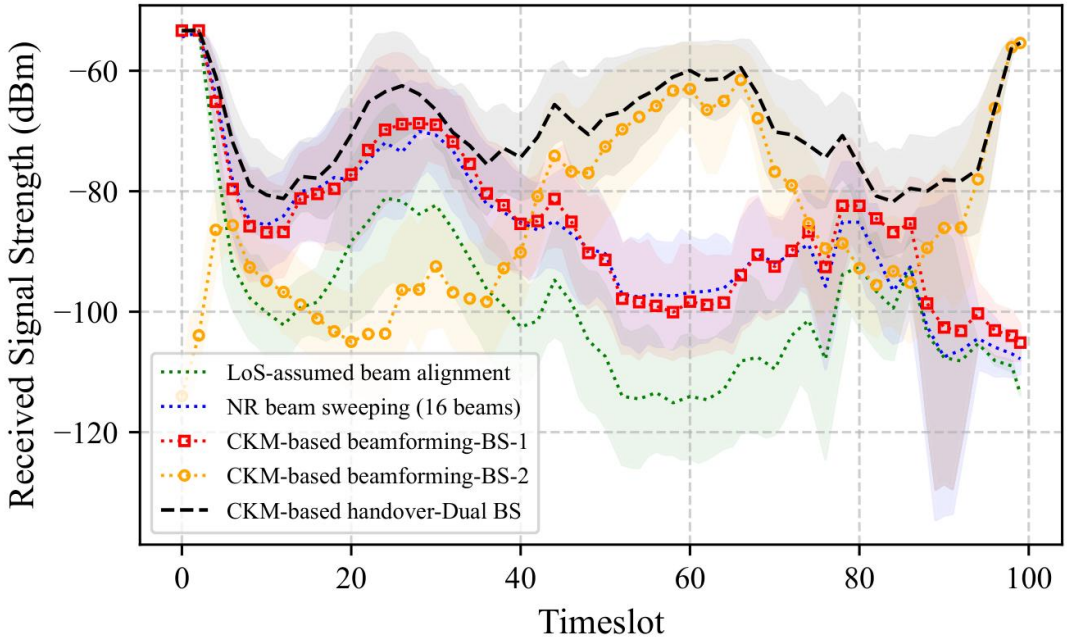
[11] L. Zhao, Z. Fei, **X. Wang***, et al., "Intelligent Beamforming and Handover via Physics-Informed Beam-Aware CKM Diffusion," accepted by IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2026. Available： https://arxiv.org/abs/2609.34704

多基站协同的波束与切换决策

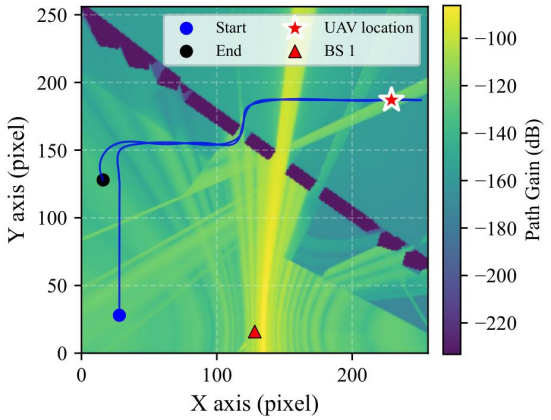
北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

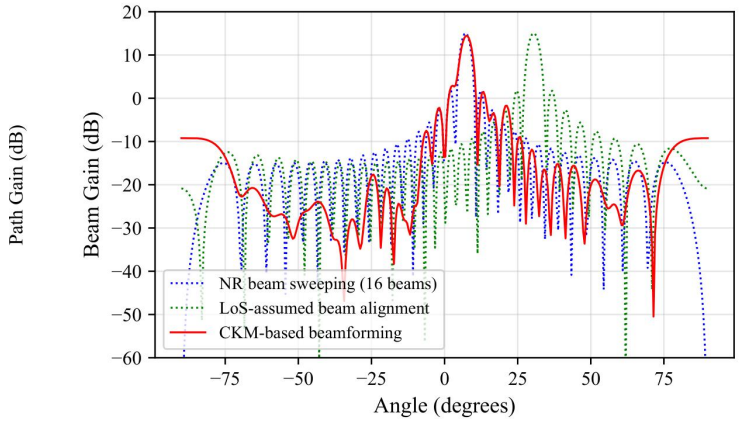
仿真验证

- 动态链路性能： 联合决策能够在不同基站之间选择较优链路，减轻严重遮挡造成的接收功率下降，接收功率曲线整体接近**两个候选基站中较优链路的包络**
- 对比基线： 基于LoS几何方向的波束对齐，以及所采用的16波束NR码本扫描方案。



无人机飞行过程中的接收功率变化





典型 NLoS 遮挡时刻：BeamCKM 与角度域波束增益

CKM 波束利用反射/绕射避开阻挡

在建筑遮挡条件下，几何LoS方向未必对应最优传播路径；波束条件CKM能够利用环境相关的非视距传播信息，寻找更有利的波束配置。

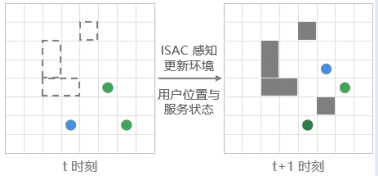
利用数字孪生联合评估候选基站与连续波束配置，改善遮挡条件下的链路质量与覆盖连续性。

总结与展望

北京理工大学 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

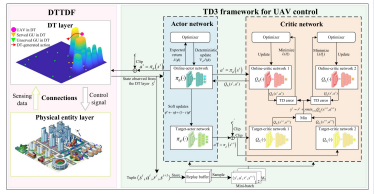
物理环境孪生：动态认知与决策

面向**环境不确定**的低空场景，实现**从感知到决策的闭环**



具身智能增强的UAV轨迹设计

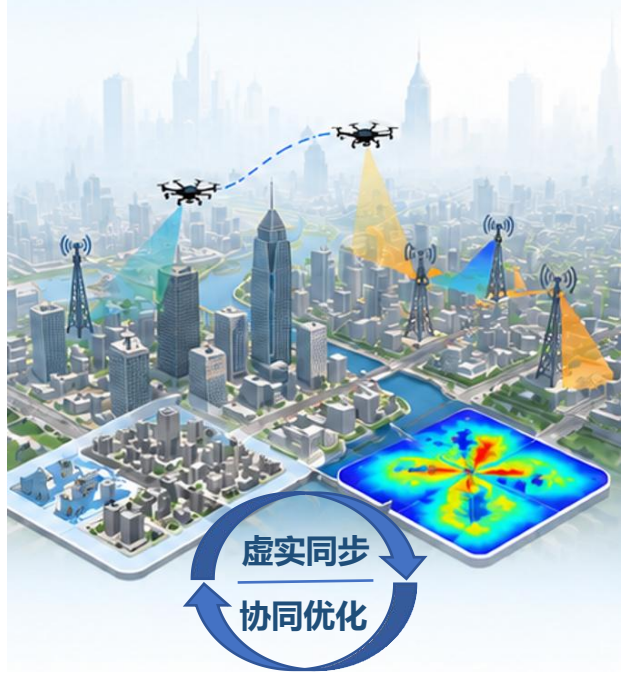
- 已有粗略地图，但存在误差
- 实时感知修正环境认知
- 基于动态环境的轨迹优化



数字孪生辅助的UAV轨迹设计

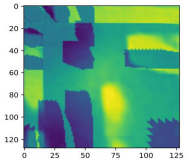
- 任务区域缺少可靠先验
- 虚拟场景训练与在线更新
- 候选动作安全预检与轨迹优化

低空数字孪生



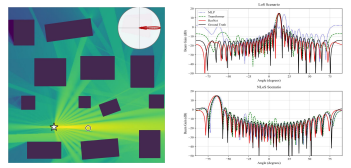
信道地图孪生：构建与网络优化

面向**环境确定**的低空场景，实现**从性能预测到资源调度的闭环**



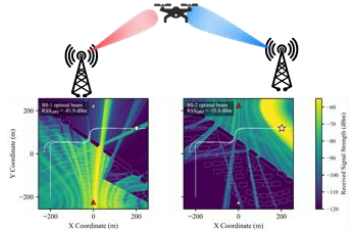
环境特定信道地图构建

- 三维信道地图/干扰感知地图
- 可微信道地图



波束建模与智能管理

- 波束条件信道地图
- 智能波束管理与连续波束预测



多基站协同与网络决策

- 多基站波束优化与切换
- 基于CKM的轨迹与资源优化

工作总结

- 针对低空信息网络的环境不确定性和信道动态变化，构建了**物理环境孪生**和**信道地图孪生**两类模型；
- 通过持续感知与环境认知更新，实现面向不确定环境的**无人机轨迹优化**与**安全决策**；
- 构建了环境特定的信道知识地图，支持传播性能预测、波束管理和基站切换等网络优化；
- 两类孪生模型形成从**感知、预测到决策执行**的链条，为低空网络的预测式优化提供支撑。

未来展望

- **世界模型驱动的数字孪生**
  学习低空物理环境与无线传播的动态演化规律
- **真实场景验证与持续更新**
  研究仿真与真实环境差异下的模型适配和在线更新
- **可信推理与安全决策**
  研究融合物理先验与不确定性量化的可信推理方法