

数字孪生网络 原型机系统

Digital Twin Wireless Networks

向路平、温耀、彭于波

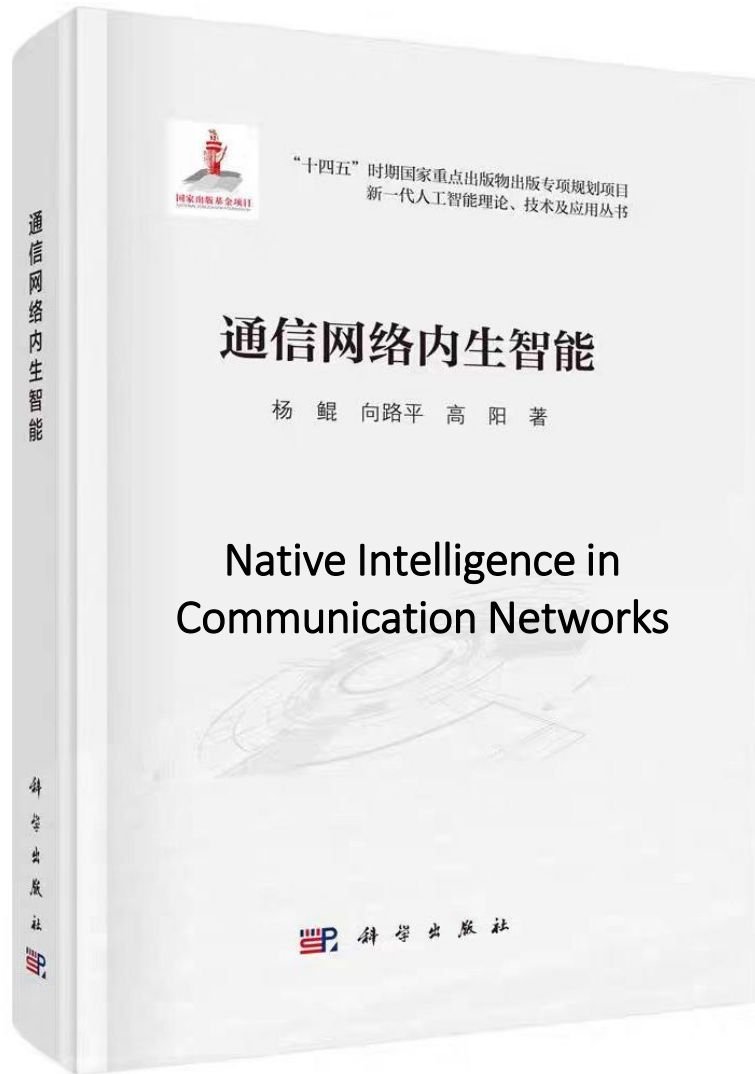
南京大学 智慧网络与通信研究院

南京大学 计算机软件新技术全国重点实验室

2025年10月17日

- 数字孪生
- Matlab通信仿真平台
- 孪生网络仿真平台
- 5G接入网架构O-RAN
- 5G原型系统
- VR立体视频播放系统
- 具身智能

通信网络内生智能



- 端到端设计(end-to-end design)
 - 物理层AI (Phy-AI)
 - 网络架构: O-RAN/AI RAN
- 语义通信Semantic Comm
- 数字孪生网络 DTN

通信网络内生智能

江苏省产业科技创新领军人才“DF计划”

通信网络内生智能（偏重学科和团队建设）

数据驱动的端到端
通信（物理层）

数字孪生网络

大模型辅助的
语义通信

江苏省科技计划基础研究
计划重点项目

面向通信网络内生智能的
通感算多域协同理论与技术

- ❑ 引入内生智能技术
- ❑ **空天地海多域**
- ❑ 设计物理层的端到端架构
- ❑ 实现收发端全局优化

苏州市科技计划项目-姑苏
领军人才-创新

全链条自演进可伸缩的
移动通信网络数字孪生

- ❑ 设计自演进无线信道、链路和网络、业务的全链条孪生
- ❑ 实现可伸缩的数字孪生网络系统设计

苏州市高新区重点创新团队

射频-视觉融合的超高效通信
技术及应用

- ❑ 提出射频-视觉融合的超高效通信技术
- ❑ 开发“融合通信模块”和“语义摄像头”

我们认为的数字孪生是什么？ What is DTN?

- 数字孪生在各行各业都是热词 Digital Twin is a buzzword everywhere!



虚拟现实/增强现实
VR/XR

漂亮的可视化
Visualization

$$DT_k(t) = \{e_k(t), \hat{e}_k(t)\}, \forall k \in K$$

Difference from real entity

公式中的新变量

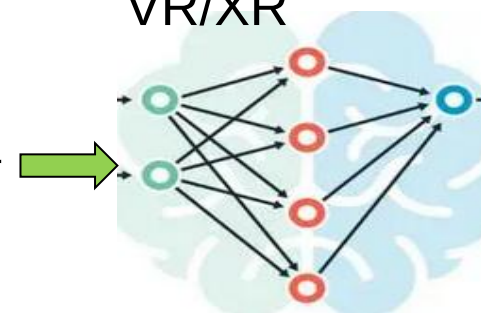
New variables



知识图谱

Knowledge Graph

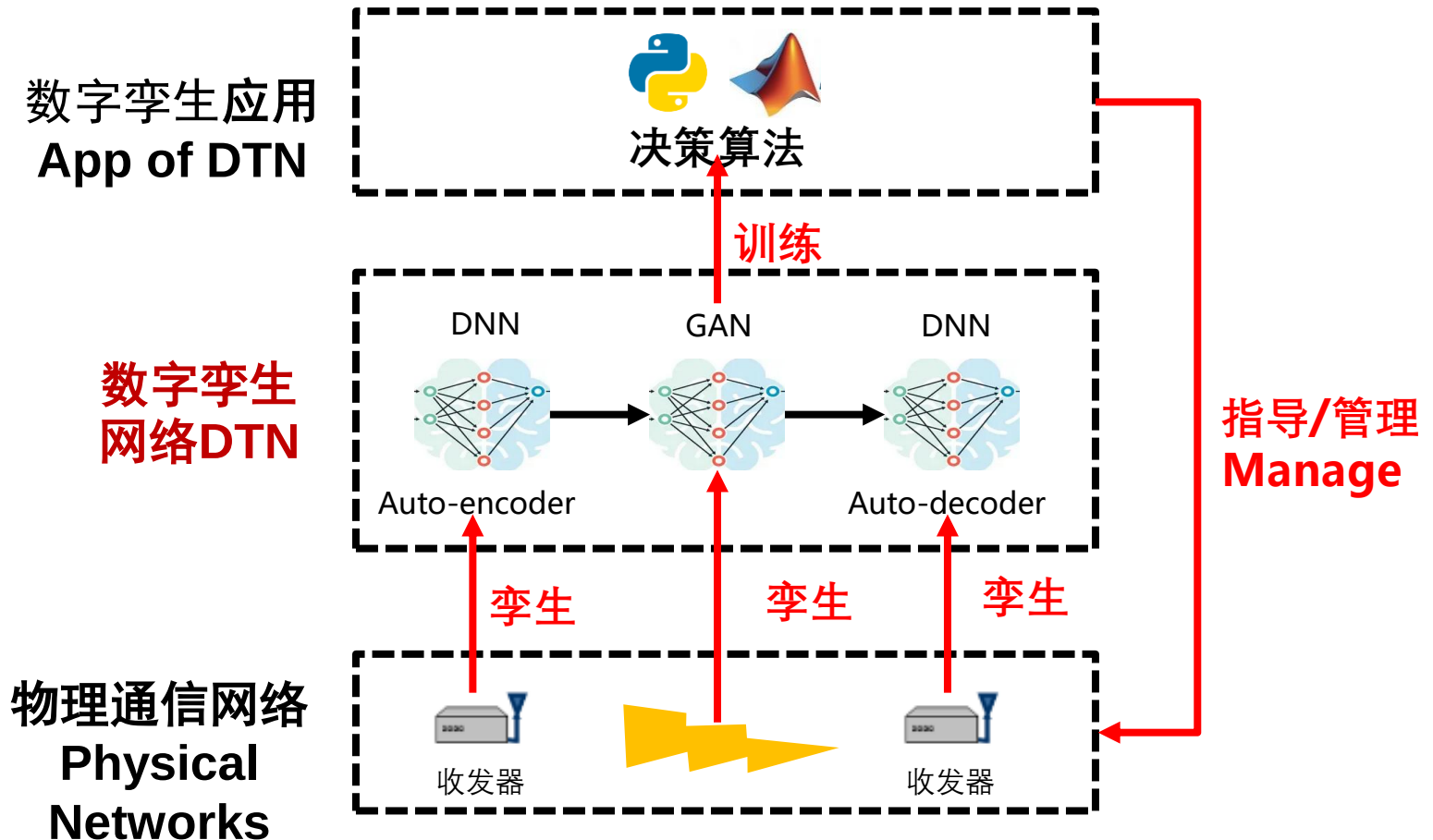
数据
data



深度神经网络

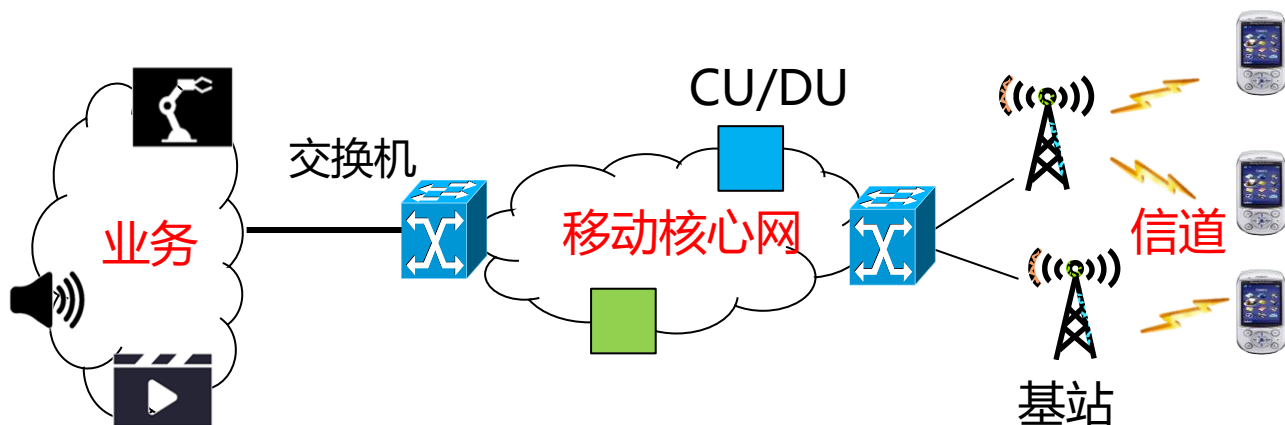
Deep Neural Network

数字孪生网络 (Digital Twin Network: DTN)



- 该DTN不是对网元的一对一映射，而是特征提取
- 通过该DTN来辅助实体网络的管理和运维，（注意：这里不是基于日志的事后被动分析，而是**在线主动决策**），进而降低能耗并提升通信网络效率
- **预测**未来而非仅仅基于**当下** future (predictive) vs now

总体技术思路

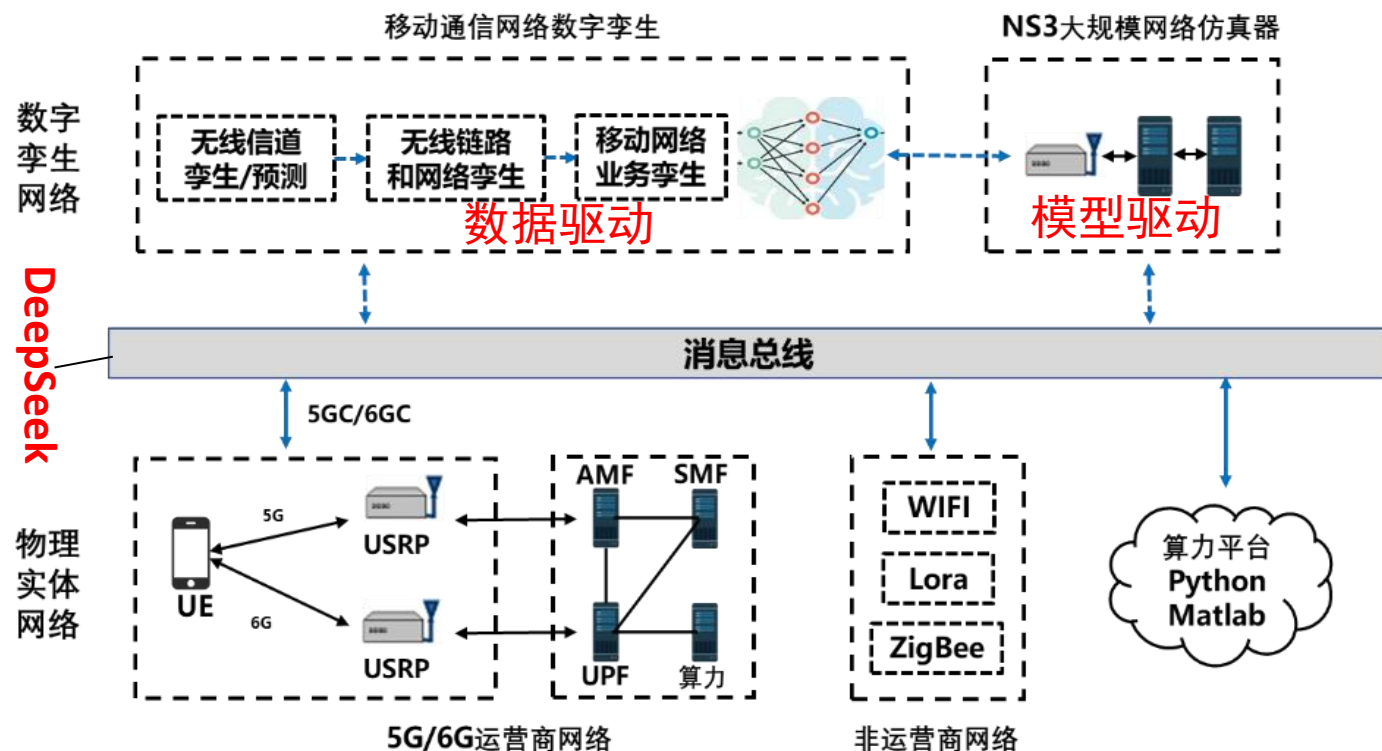


- Full-chain: channel, link/network, and services 全链条：包括信道、链路/网络和业务
- Self-evolving: 自演进: DTN不可能包罗万象，需要动态增加新功能，性能自我提升
- Elastic 可伸缩：DTN软件上可拆减组装，适应不同需求

可伸缩数字孪生网络系统设计和实现

- 思路：通过软件系统实现数字孪生网络，达到**可用**
- 意义：**对内**，在架构上增加新功能和场景；**对外**，自由选择搭配生成不同大小/复杂度的DTN以适应个性化需求（如通信环境和算力） - **可伸缩**
- 技术挑战：**系统架构**、协议和具体实现机制设计

- 技术核心：
 - 可插拔的**总线结构**，消息格式定义；
 - 数据-模型**双驱动**：既有基于数据驱动的（神经网络）孪生，又有基于模型驱动的（仿真，**物理定理/数学公式**）孪生
 - **数据集+神经网络 (Python code)**



使用Matlab仿真通信链路

基本特点

- 开放式模型接口和GUI演示模块
- 基于模型驱动的通信物理层仿真

平台使用

- 在GUI中依次设置各模块参数,点击开始仿真后即可绘制所需曲线和图像

有关循环

信源

信源编码解码

信道编码解码

数字调制解调

MIMO

信源编码方式

huffman

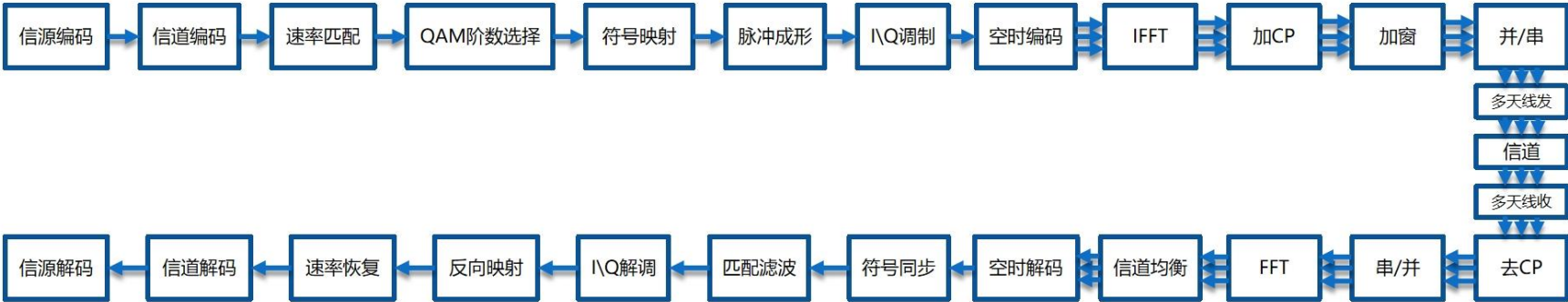
huffman

binary

(信源解码自动继承对应的方式,因而无需设置,

开放式模块接口,允许使用自定义模块

通信物理层仿真模块



使用Matlab仿真通信链路

6G通信系统仿真平台

有关循环

信源

信源编码解码

信道编码解码

数字调制解调

MIMO-OFDM

传输信道

信道估计

开始仿真

模块卡组

数字调制方式

qamModu...

(数字解调自动继承对应的方式，因而无需设置，比如：数字调制方式选择为"16QAM"时，数字解调方式自动继承为对应的"16QAM")

调制阶数

4

应用

显示当前应用参数

选择绘图对象

数字调制解调收发星座图

绘图

参数设置

显示当前应用参数

数字调制方式: qamModulator

数字解调方式: qamDemodulator

调制阶数: 4

星座图

正交分量

同相分量

绘图显示

0

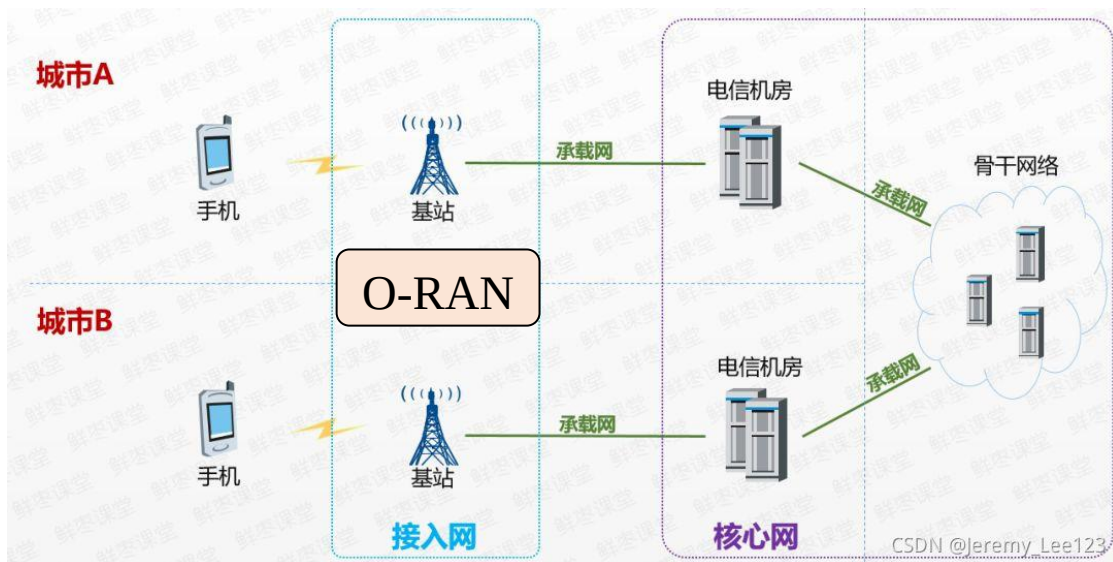
大规模化的数字孪生网络仿真平台



大规模化的数字孪生网络仿真平台-自组织路由

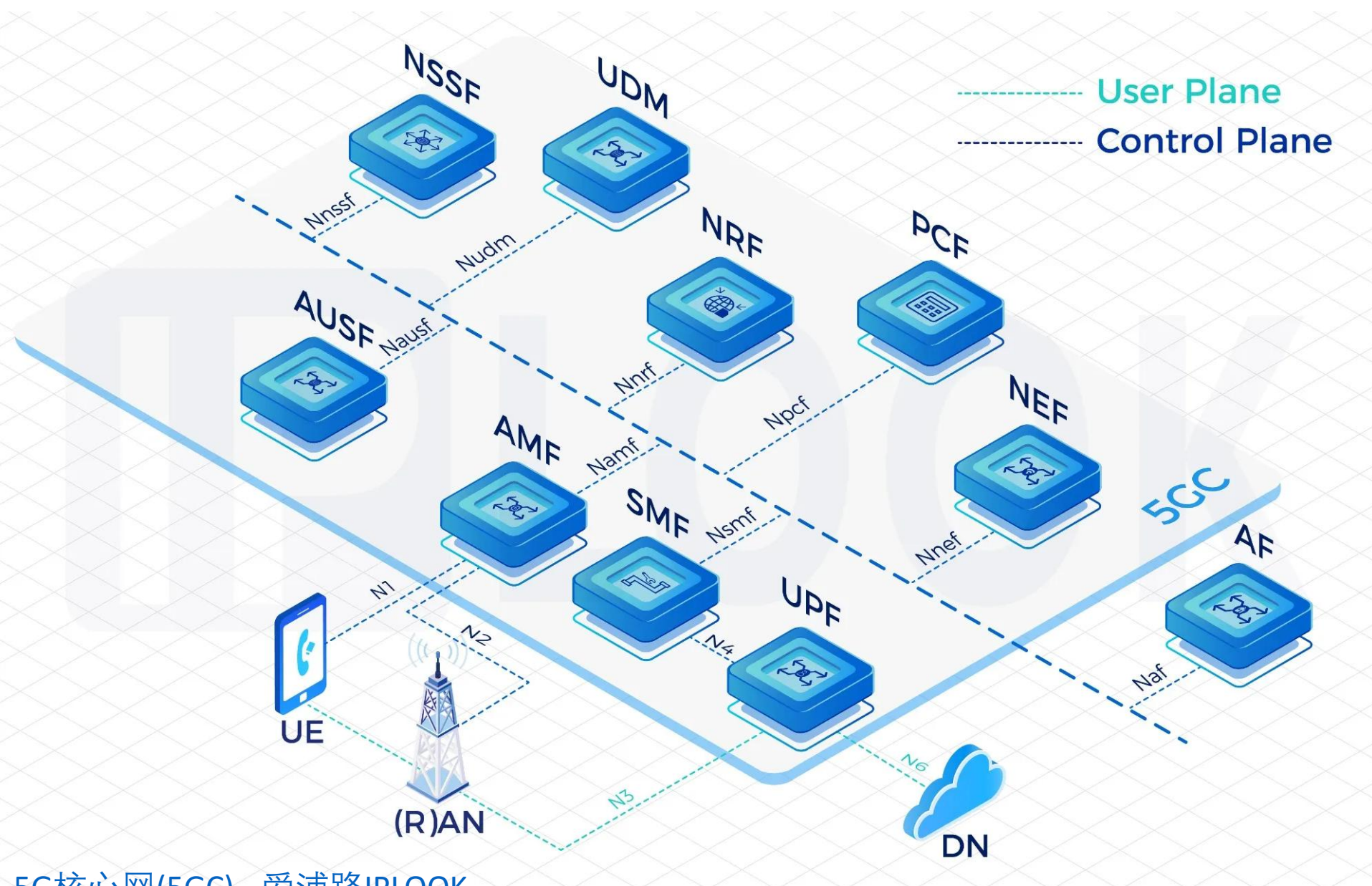


传统无线接入网——RAN



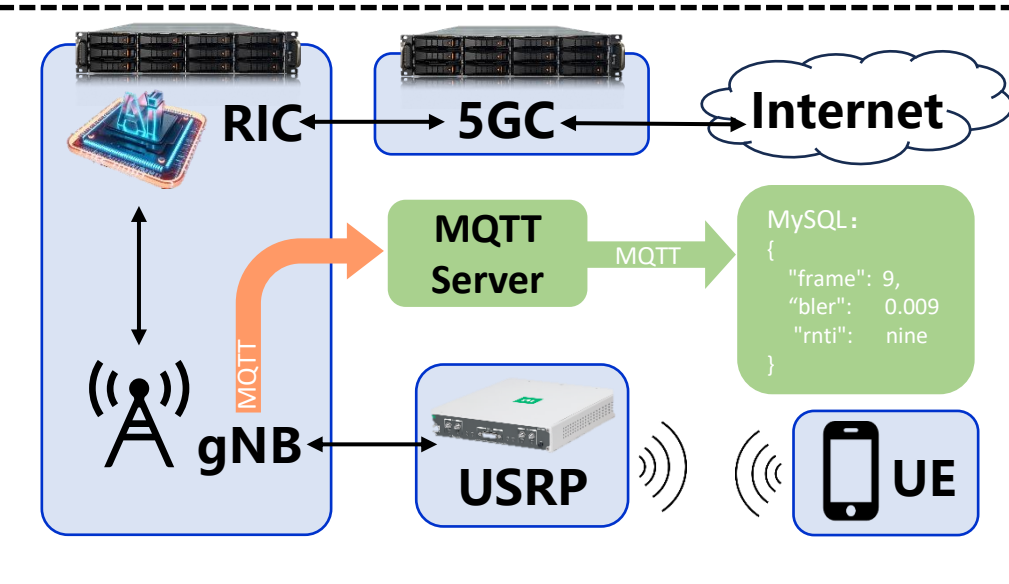
开放无线接入网（O-RAN, Open Radio Access Network）是一种基于开放性、智能化和虚拟化理念的新型无线接入网架构。其核心目标是打破传统RAN设备“端到端”封闭的部署模式，通过开放接口、模块化设计和多厂商互通，提升网络的灵活性和可扩展性。O-RAN架构中引入了虚拟化的基带单元（vDU、vCU）、分布式与集中式处理模式，以及由AI驱动的智能控制器（RIC, RAN Intelligent Controller），从而支持网络的按需优化和智能资源调度。

5G核心网(5GC)

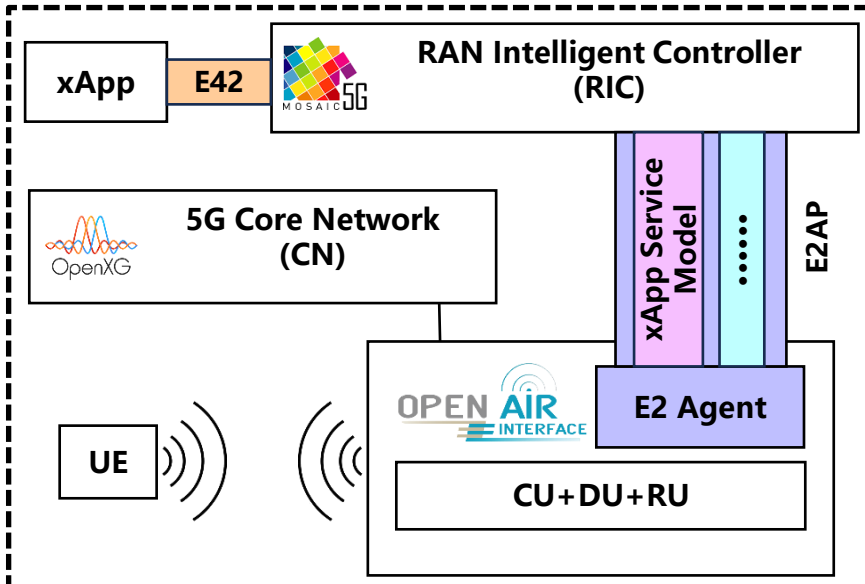


基于O-RAN架构的5G系统

系统物理架构 Physical Architecture



系统软件架构 Software Architecture



基于O-RAN架构的5G系统 5G Mobile System Enabled by O-RAN



5G Base Station (OAI 5G):

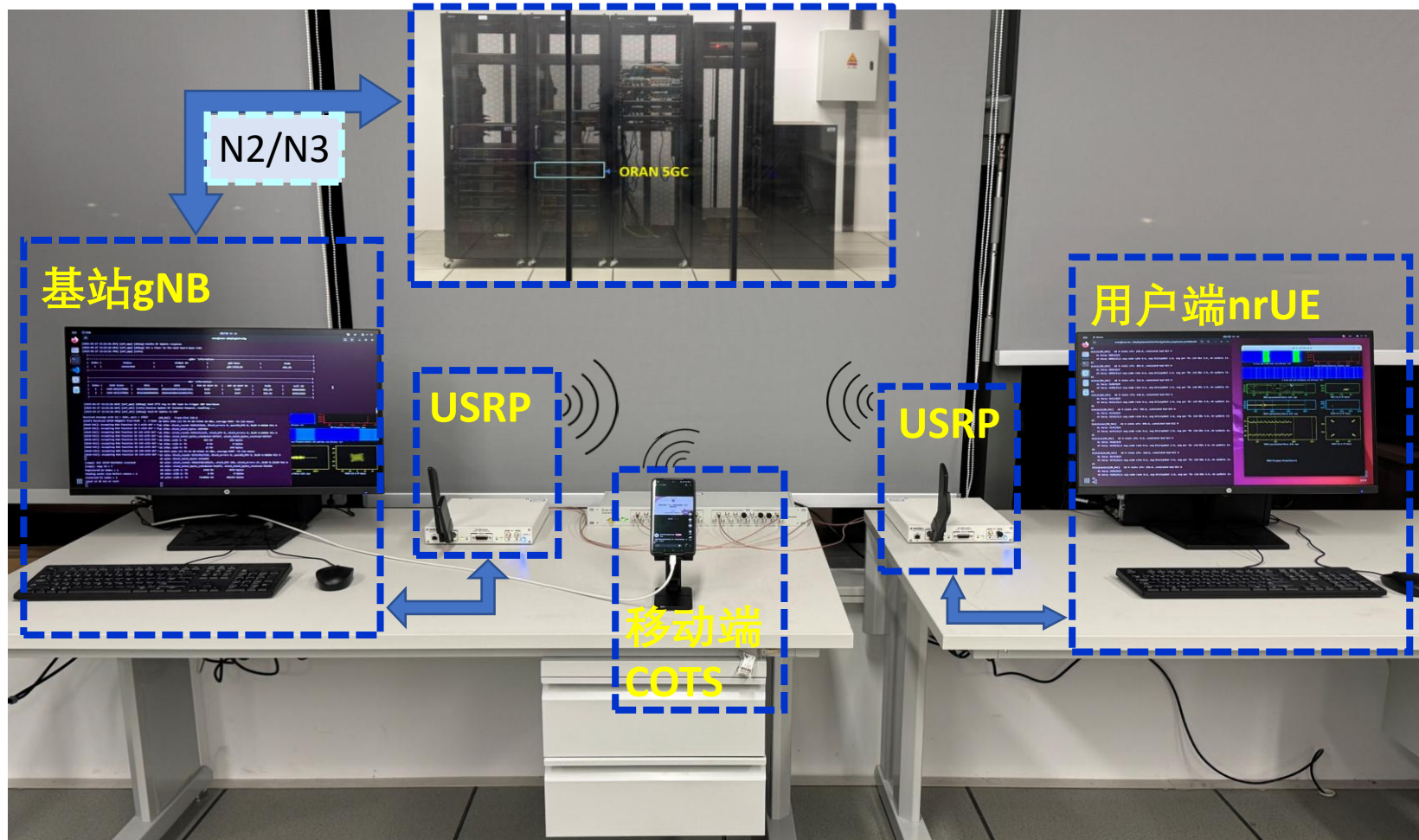
- CU+DU+RU
- 多个UE接入
Multiple UE access
- 通过USRP无线信道
USRP wireless channel



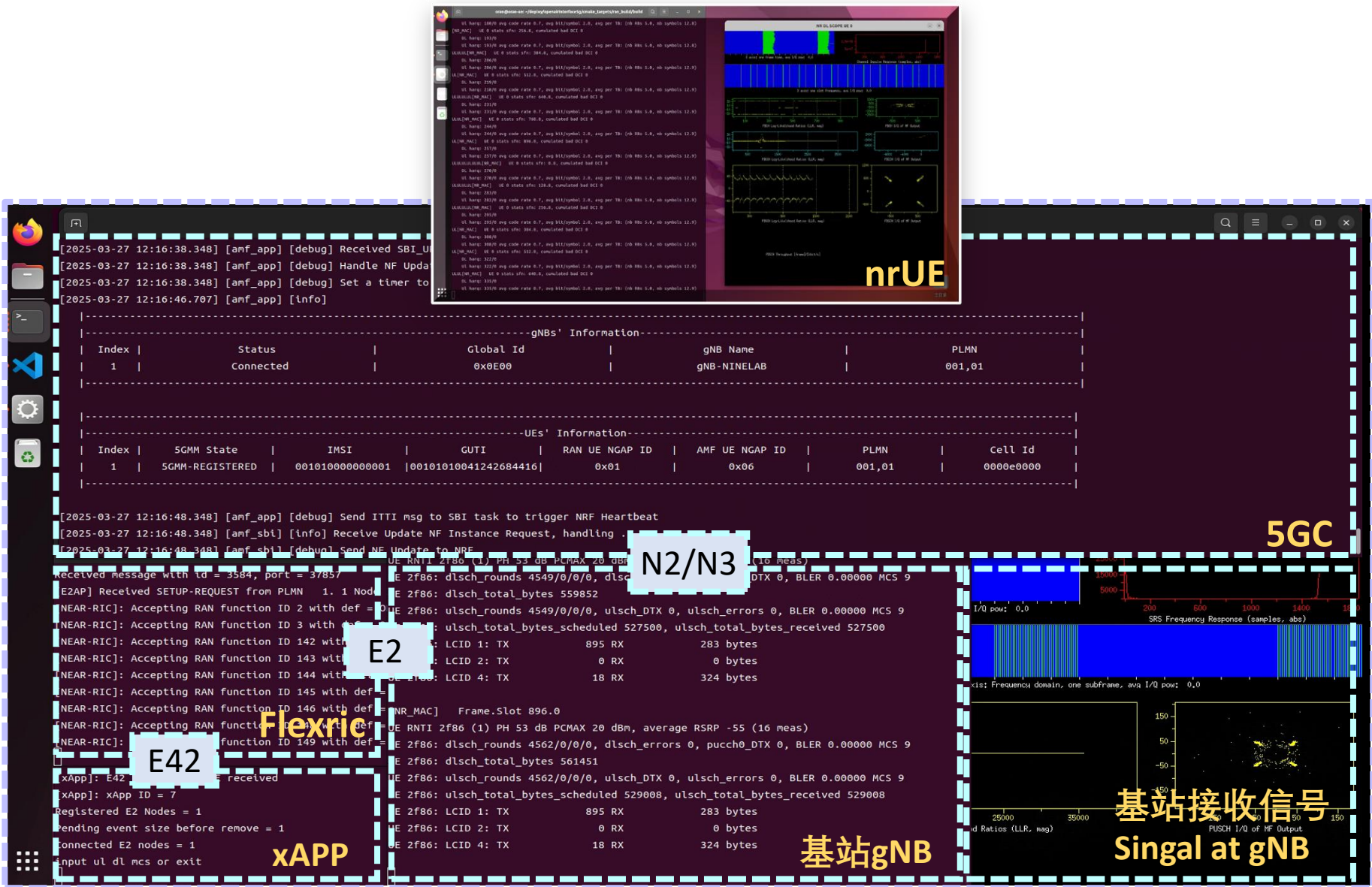
RAN Intelligent Controller (FlexRIC):

- 通过E2接口与5G系统连接
Connects to 5G systems via the E2 interface
- 支持自定义xApp开发,
Supports custom xApp development
- 基站数据采集,
Collects base station data
- 下发控制指令,
Issues control commands

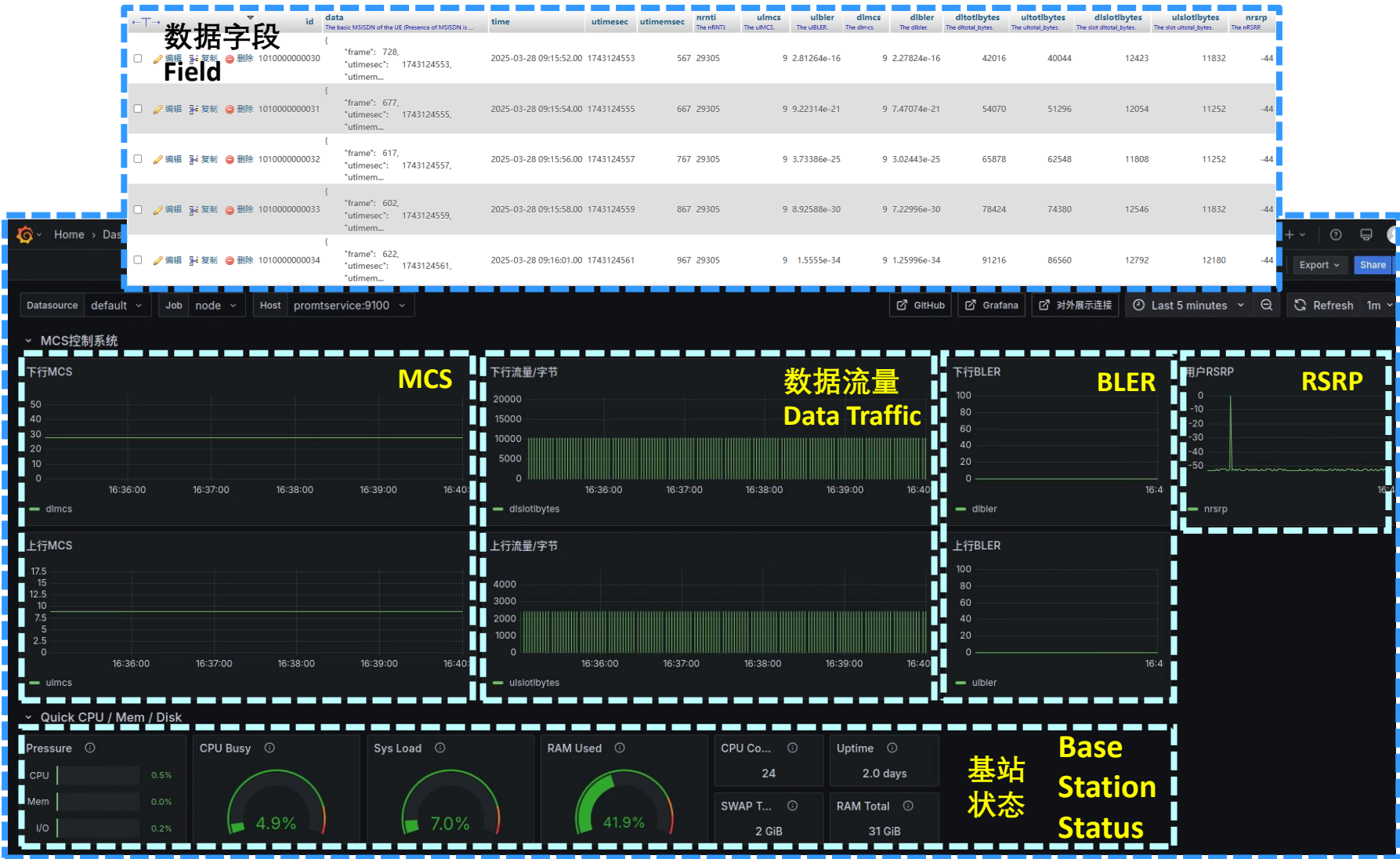
基于O-RAN架构的5G系统实物系统



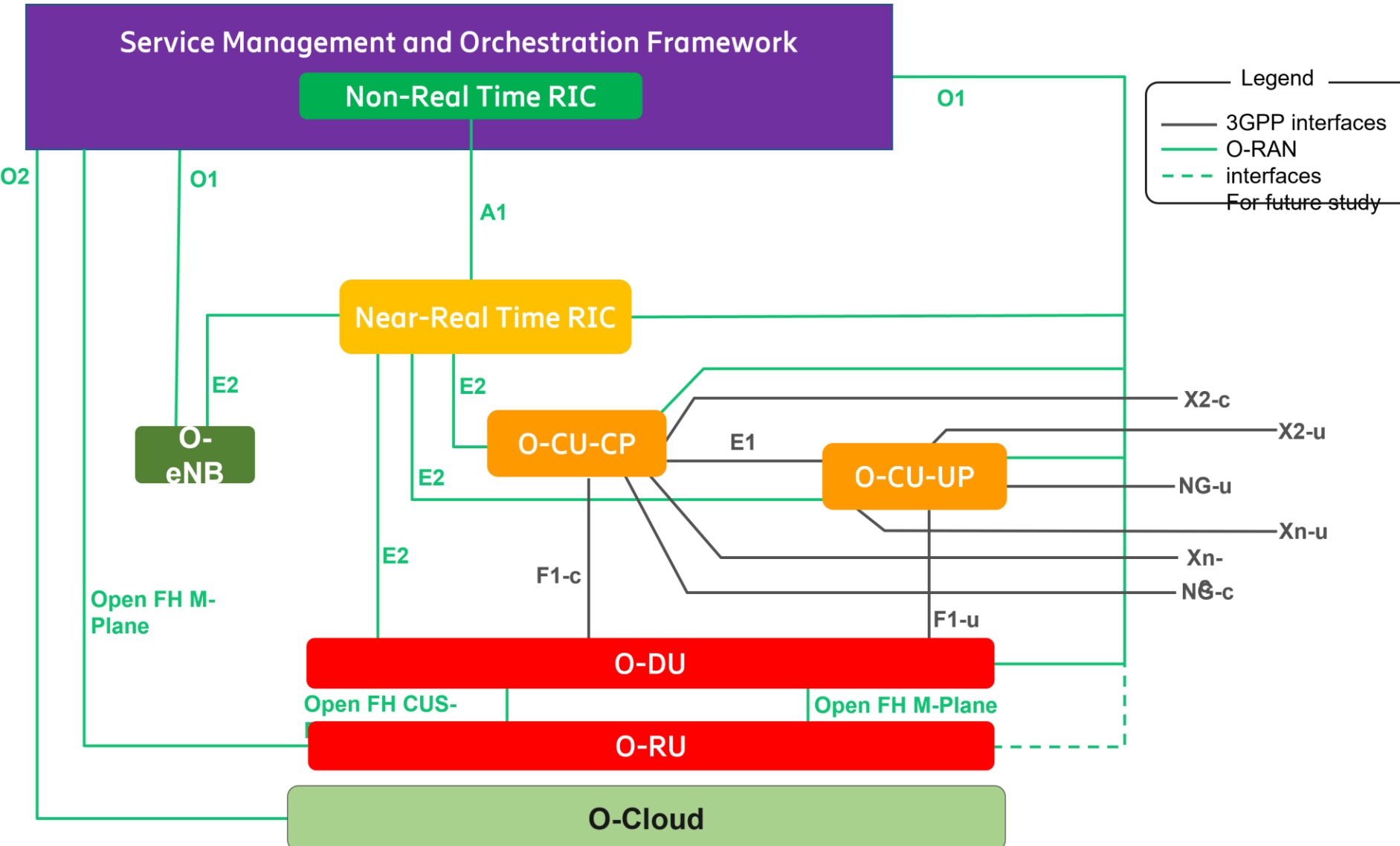
基于Flexrix&xAPP的5G系统搭建-RAN控制



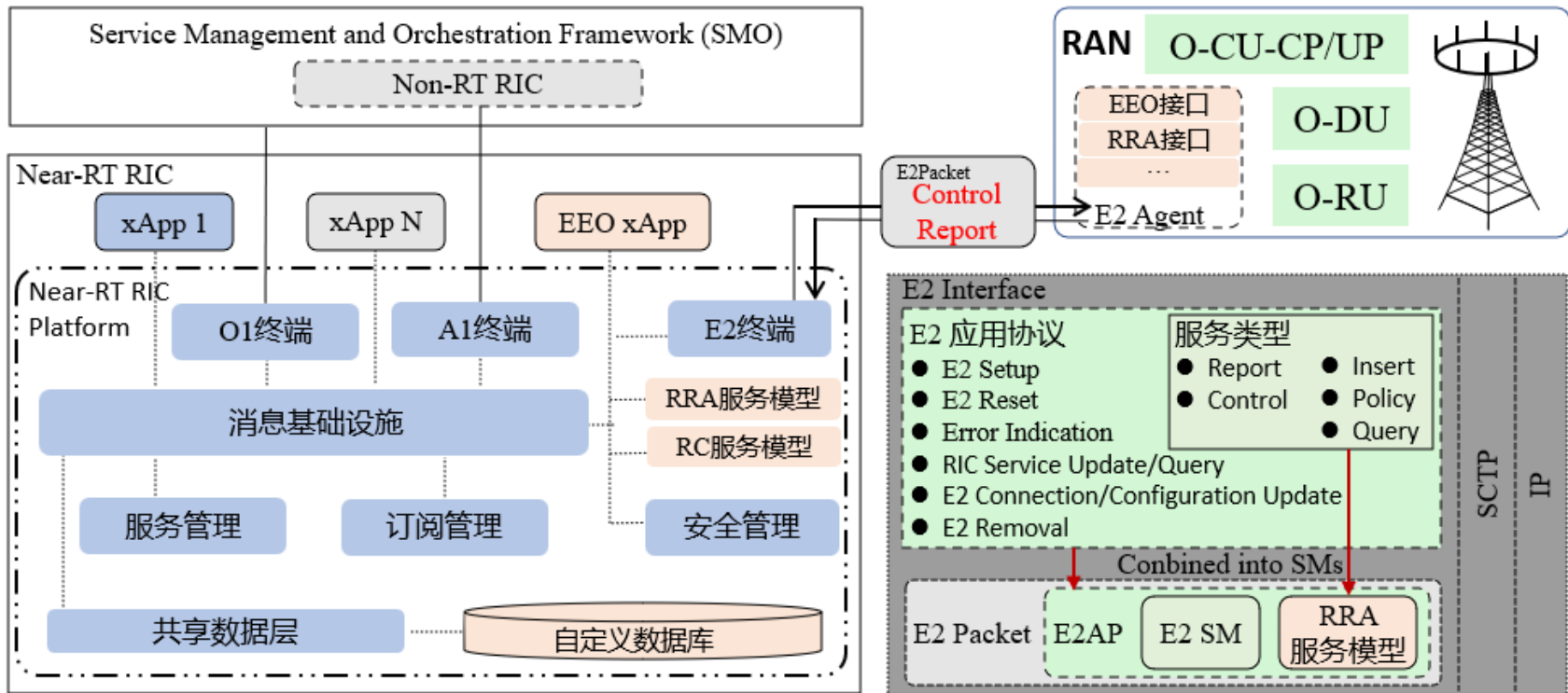
基于O-RAN架构的5G数据收集系统-数据采集



O-RAN 架构概況

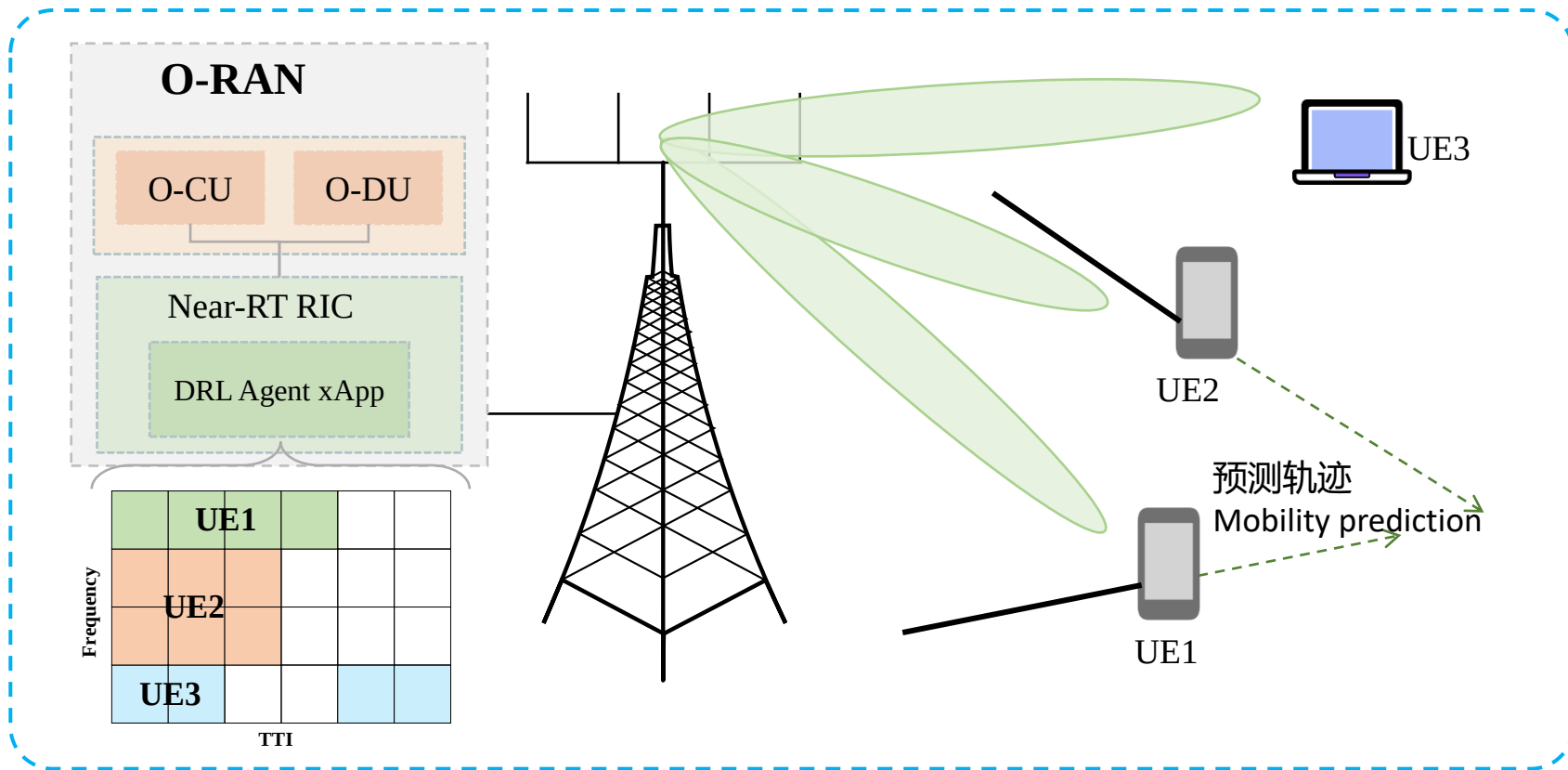


O-RAN 架构协议



E2全局应用层服务Global	RAN功能类型	RIC功能服务模型
E2 Setup	Report	RIC Subscription
E2 Reset	Insert	RIC Indication
Error Indication	Control	RIC Control
RIC Service Update/Query	Policy	RIC Query
E2 Connection/Configuration Update	Query	RIC Service
E2 Removal		RIC Assistance

O-RAN 架构下AI辅助资源分配 – DRL-enabled Dynamic Resource Allocation Aided by xAPP



- 用户移动模型建模，卡尔曼滤波对位置信息去噪，**提升目标感知精度**
- LSTM预测用户下一时刻位置信息，**避免**因实时信息决策造成**策略滞后**
- SAC深度强化学习综合调度资源块分配和功率分配，**提升系统能效**

Functional Split (FS) Options 功能分割选项

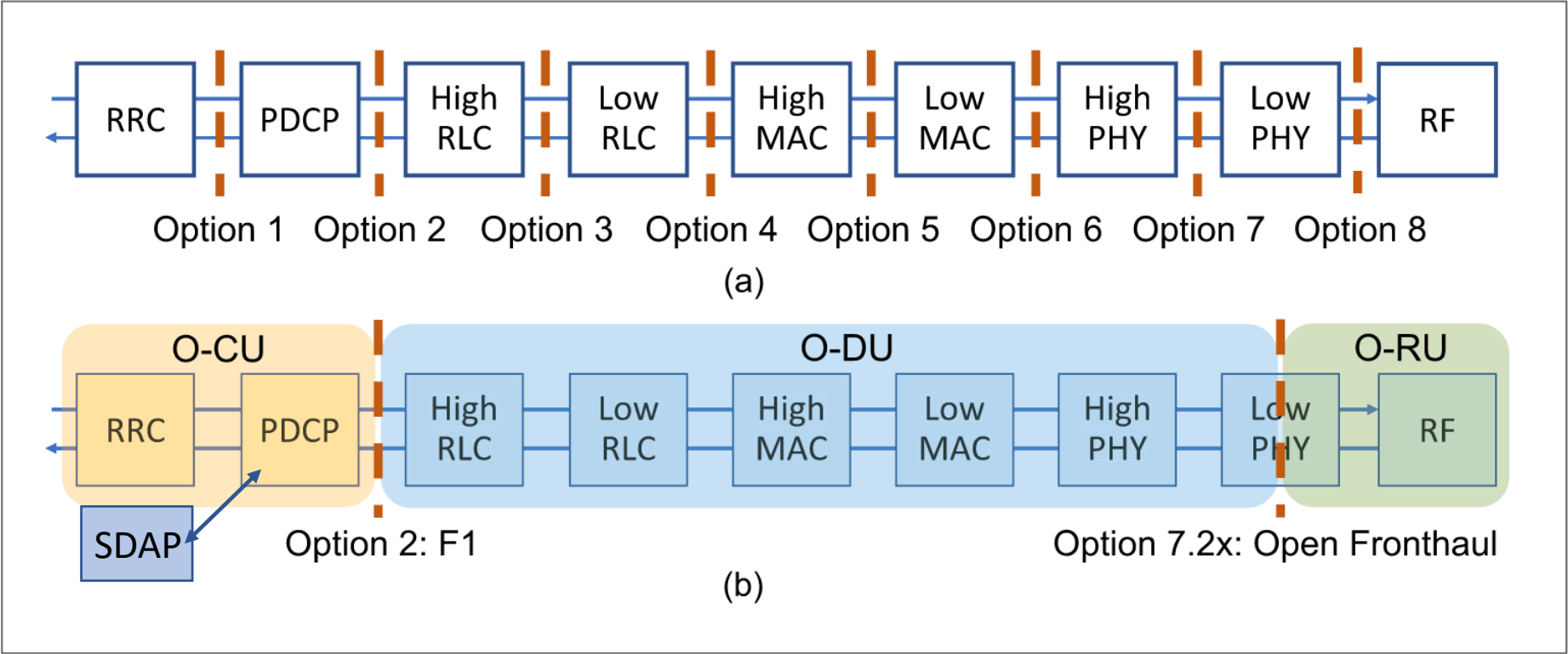


FIGURE 3. a) 3GPP FS options; b) O-RAN FSs and interfaces between the O-CU, O-DU, and O-RU.

[1] A. S. Abdalla, P. S. Upadhyaya, V. K. Shah, and V. Marojevic, Toward Next Generation Open Radio Access Networks: What O-RAN Can and Cannot Do![J]. *IEEE Network*, 2022, 36(6):206–213.

基于O-RAN架构的CU、DU分离部署5G系统搭建

Functional Split Options 2

■ CU+DU+RU

Activity Terminal

oran@oran: ~/usrpdeply/openairinterface5g/cmake_targets/ran_build/build

2025-06-14 14:55:16.317] [amf_app] [info]

-----gNBs' Information-----

Index	Status	Global Id	gNB Name	PLMN
1	Connected	0x0E00	cu-rfsim	001,01

-----UEs' Information-----

Index	SGMM State	IMSI	GUTI	RAN UE NGAP ID	AMF UE NGAP ID	PLMN	Cell Id
1	SGMM-REGISTERED	001010000000003	[00101010041144836342]	0x06	0x05	001,01	0000e0000

2025-06-14 14:55:16.736] [amf_app] [debug] Send ITTI msg to SBI task to trigger NRF Heartbeat

2025-06-14 14:55:16.736] [amf_sbi] [info] Receive Update NF Instance Request, handling ...

2025-06-14 14:55:16.736] [amf_sbi] [debug] Send NF Update to NRF

2025-06-14 14:55:16.736] [amf_sbi] [debug] Send NF Update to NRF, Msg body [{"op":"replace","path":"/nfStatus","value":"REGISTERED"}]

2025-06-14 14:55:16.736] [amf_sbi] [debug] Send NF Update to NRF, NRF URI http://oai-nrf:8080/nrf-nfm/v1/nf-instances/167cc842-f134-41b4-a4df-7be9812de05a

[UTIL] threadCreate() for TASK_GTPV1_U: creating thread with affinity ffffffff, prio...

[NR_RRC] Enter NR_RRC message task

[UTIL] threadCreate() for TASK_GTPV1_U: creating thread with affinity ffffffff, prio...

[NR_RRC] Accepting new CU-UP ID 3584 name cu-rfsim (assoc_id -1)

[NGAP] Send NGSetupRequest to AMF

[NGAP] 3584 -> 0000e000

[NGAP] Received NGSetupResponse from AMF

[F1AP] Starting F1AP at CU

[GNB_APP] [gNB 0] Received NGAP_REGISTER_GNB_CNF: associated AMF 1

[F1AP] F1AP_CU_SCTP_REQ(create socket) for 127.0.0.3 len 10

[GTPU] Initializing UDP for local address 127.0.0.3 with port 2152

[GTPU] Created gtpu instance id: 95

TYPE <CTRL-C> TO TERMINATE

[NR_RRC] Received F1 Setup Request from gNB_DU 3584 (du-rfsim) on assoc_id 155

[RR] Accepting DU 3584 (du-rfsim), sending F1 Setup Response

[RR] DU uses RRC version 17.3.0

[SCTP] Received SCTP SHUTDOWN EVENT

[F1AP] Received SCTP state 1 for assoc_id 155, removing endpoint

[RR] releasing DU ID 3584 (du-rfsim) on assoc_id 155

oran@oran: ~/deploy/oai-cn5g

核心网
5GC

数据采集

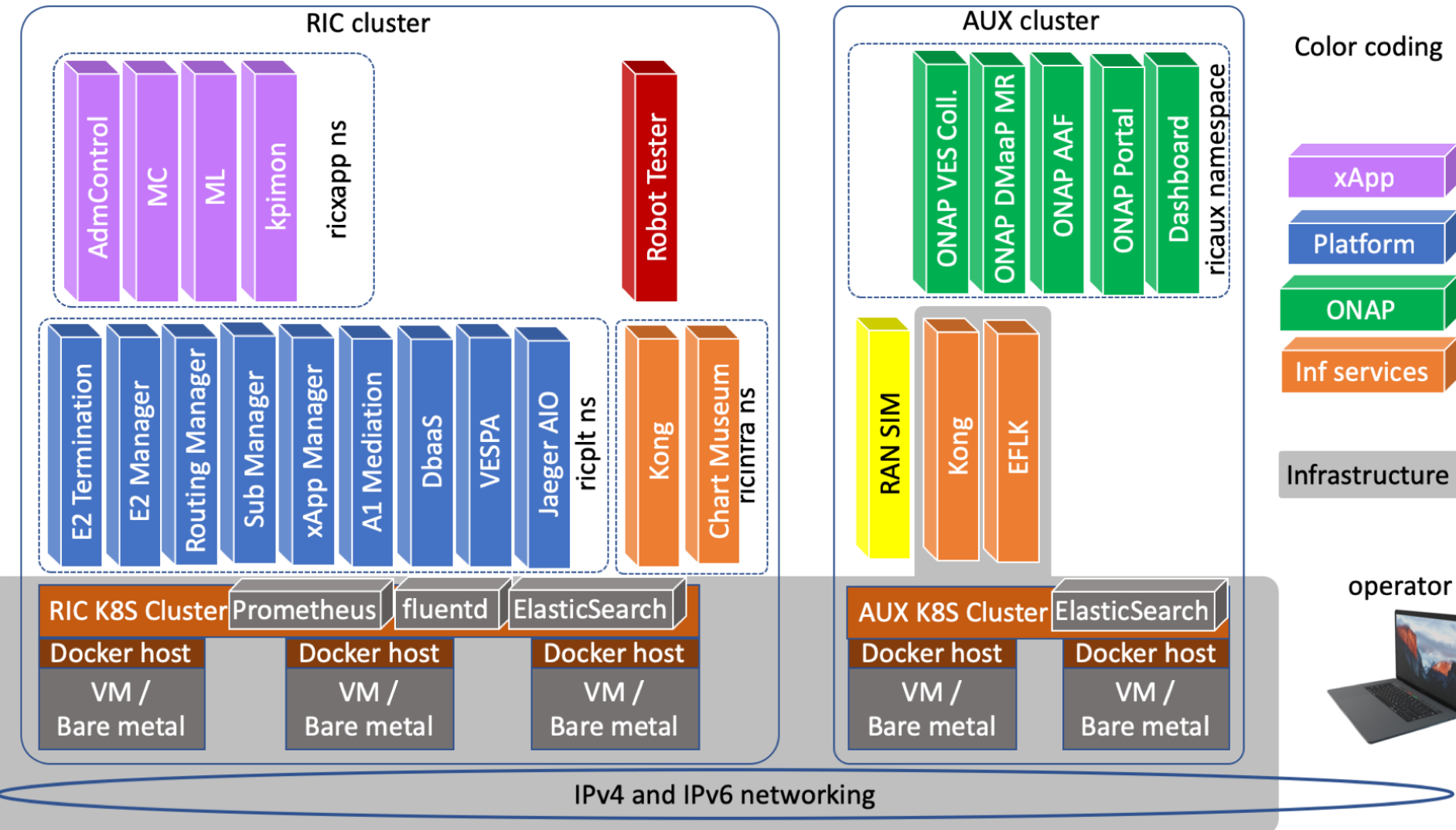
frame': 51, 'utimesec': 1749900785, 'utimeb': []]
Index out of range
frame': 261, 'utimesec': 1749900785, 'utimeb': []]
Index out of range
frame': 471, 'utimesec': 1749900787, 'utimeb': []]
Index out of range
frame': 681, 'utimesec': 1749900789, 'utimeb': []]
Index out of range
frame': 892, 'utimesec': 1749900792, 'utimeb': []]
Index out of range
frame': 78, 'utimesec': 1749900794, 'utimeb': []]
Index out of range
frame': 288, 'utimesec': 1749900796, 'utimeb': []]

O-CU

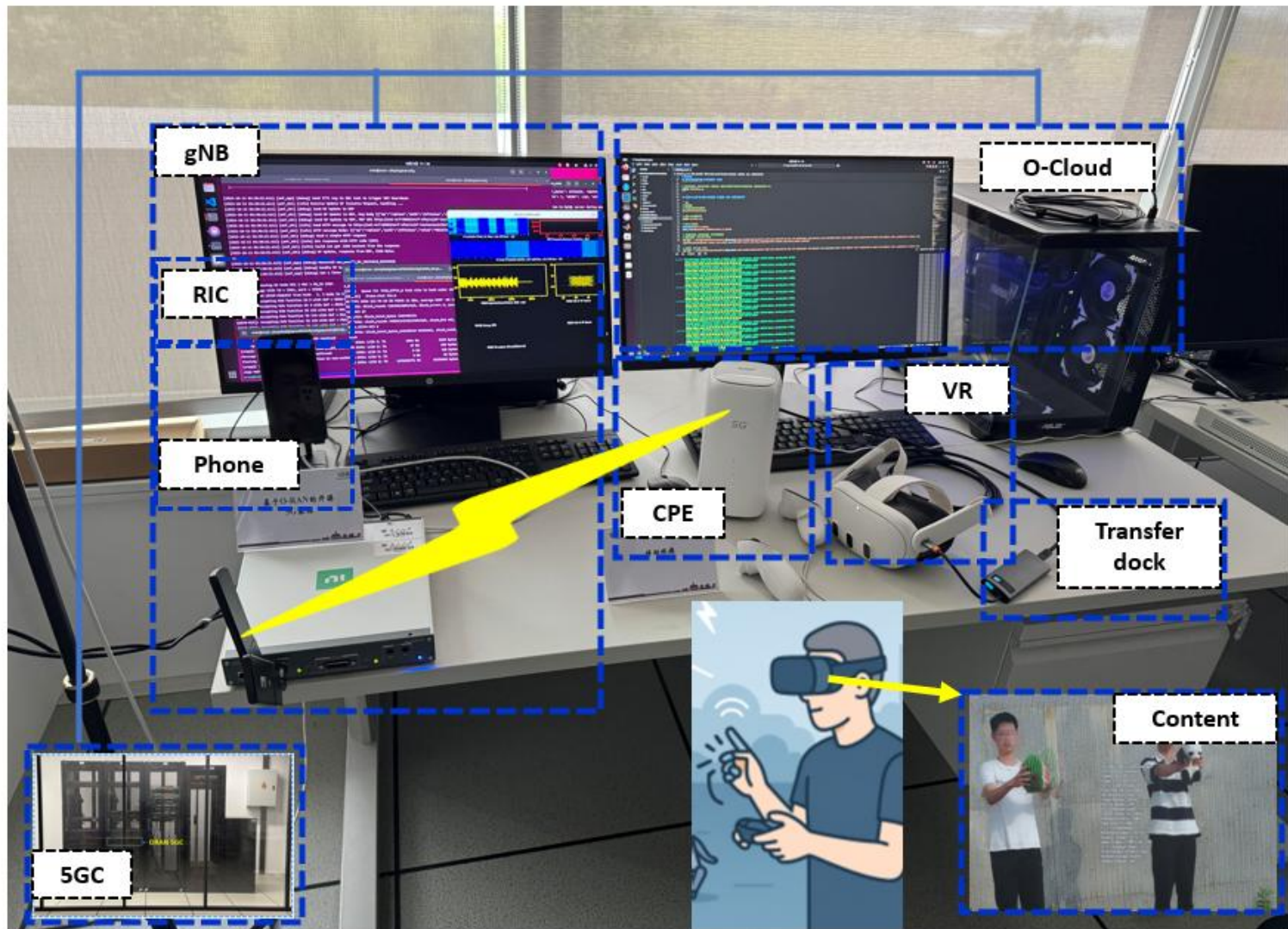
O-DU

UE fid3: MAC: TX 84342 RX 28, 'uernti': [], 'ue_list_info': []]
UE fid3: LCID 1: TX 367 RX Data operation failure. list index out of range
UE fid3: LCID 2: TX 0 RX
UE fid3: LCID 4: TX 53160 RX 16857 bytes
[NR_MAC] Frame.Slot 384.0
UE RNTI fid3 CU-UE-ID 1 out-of-sync PH 48 dB PCMAX 21 dBm, average RSRP 0 (0 meas)
UE fid3: dlsch_rounds 363/315/292/275, dlsch_errors 265, pucch0_DTX 1117, BLER 0.97322 MCS (1) 6
UE fid3: ulsch_rounds 1360/1354/1345/1342, ulsch_errors 1338, ulsch_DTX 1358, BLER 1.00137 MCS (1) 6 (Qm 4 deltaM
UE fid3: MAC: TX 84342 RX 25500 bytes
UE fid3: LCID 1: TX 367 RX 68 bytes
UE fid3: LCID 2: TX 0 RX 0 bytes
UE fid3: LCID 4: TX 53160 RX 16857 bytes
[NR_MAC] Frame.Slot 512.0
UE RNTI fid3 CU-UE-ID 1 out-of-sync PH 48 dB PCMAX 21 dBm, average RSRP 0 (0 meas)
UE fid3: dlsch_rounds 363/315/292/275, dlsch_errors 265, pucch0_DTX 1117, BLER 0.97322 MCS (1) 6
UE fid3: ulsch_rounds 1360/1354/1345/1342, ulsch_errors 1338, ulsch_DTX 1358, BLER 1.00137 MCS (1) 6 (Qm 4 deltaM

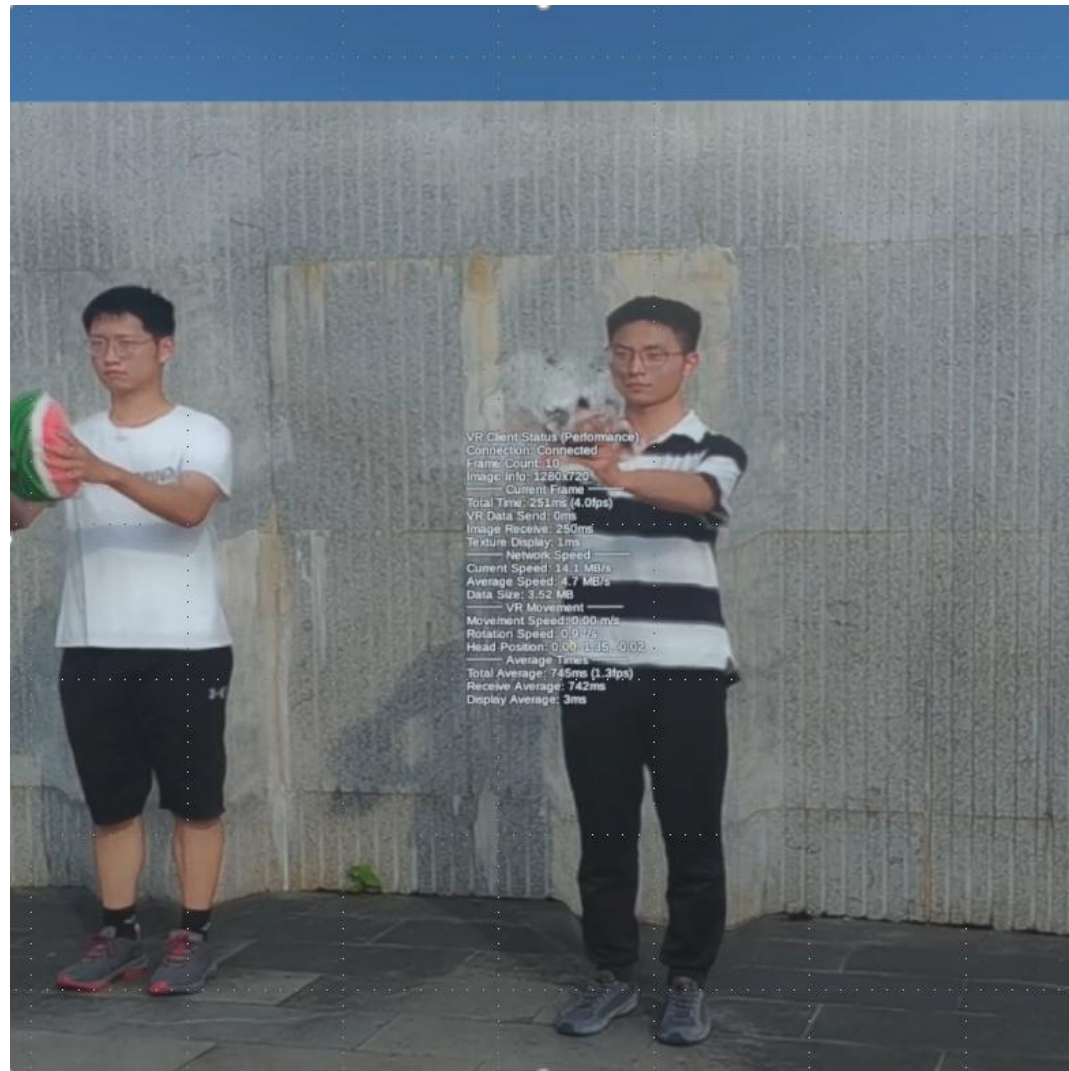
基于K8S的RIC集群部署



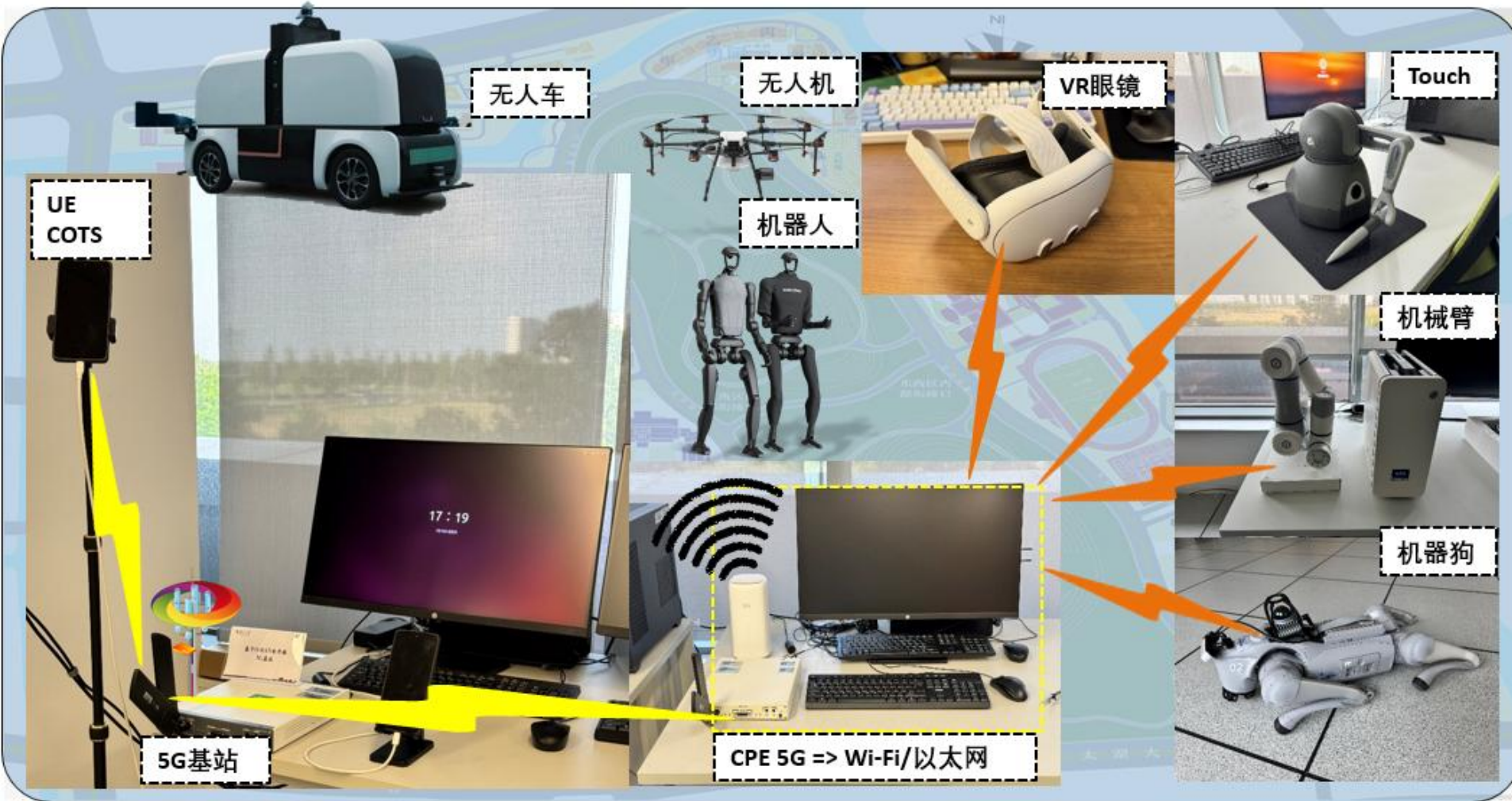
基于O-RAN架构支持的VR立体视频播放系统



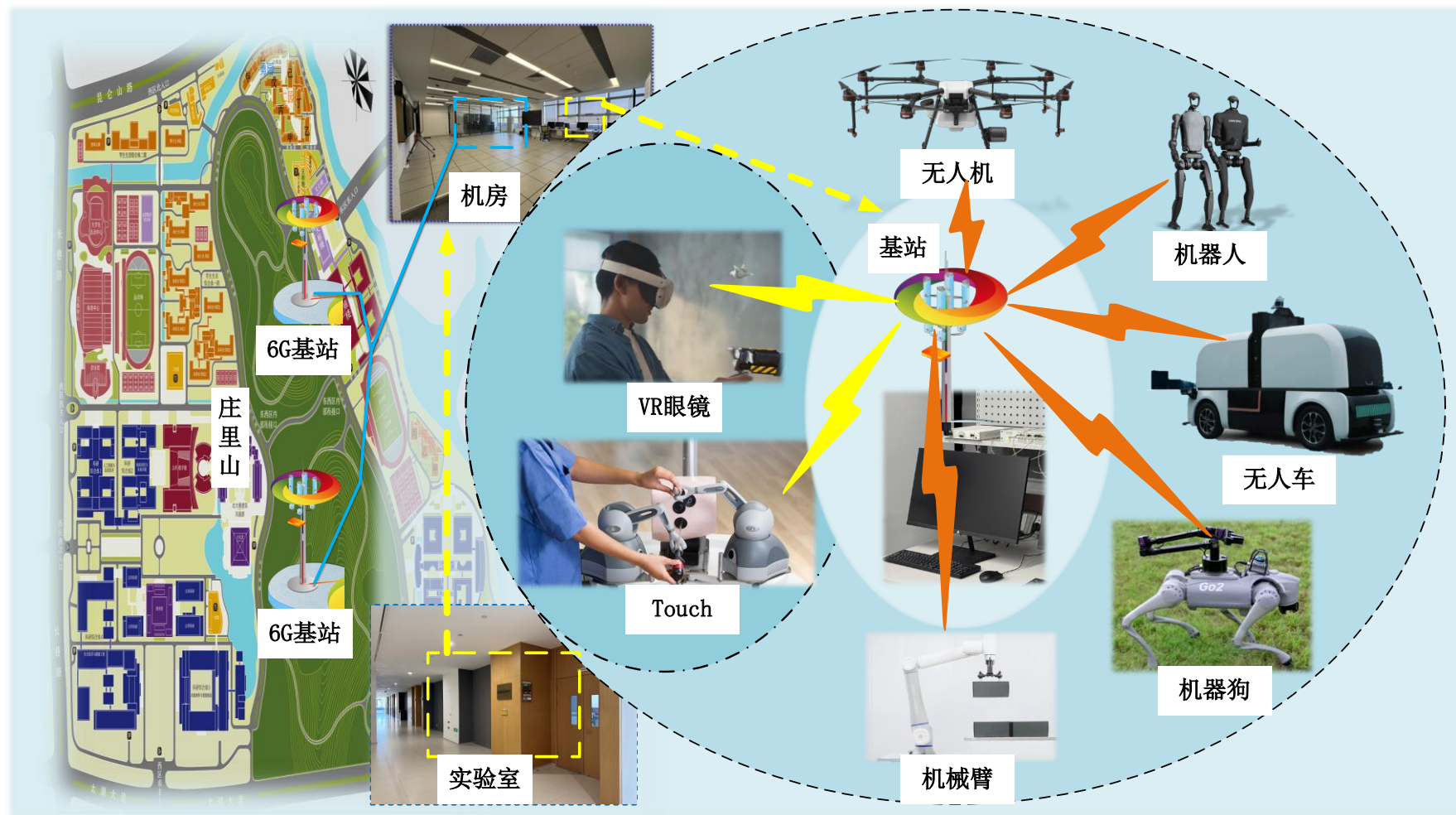
VR眼镜连接O-RAN基站



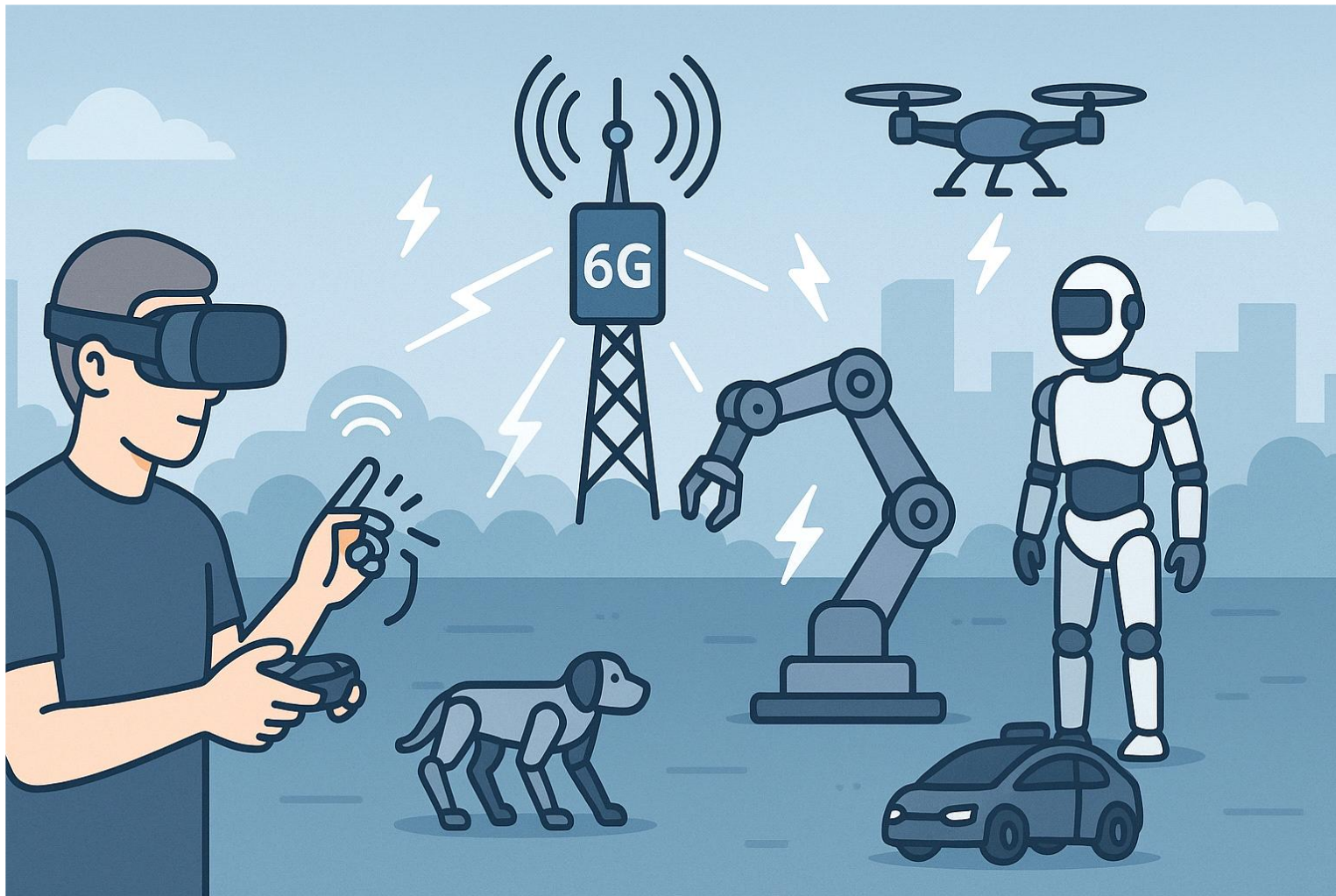
基于O-RAN架构的具身智能体



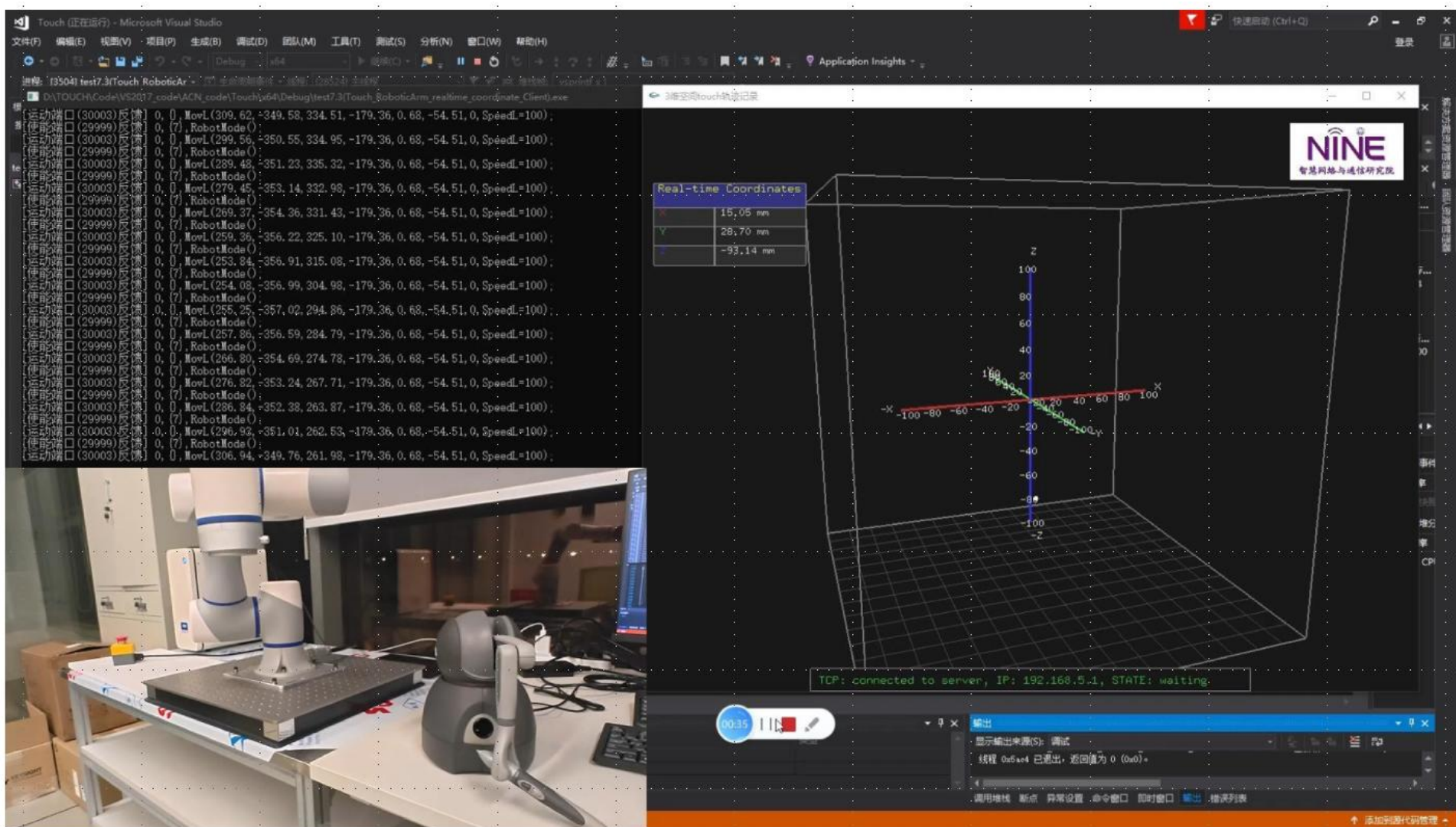
基于O-RAN架构的具身智能体架构



基于O-RAN架构的具身智能体畅想



Touch连接机械臂



感谢观看!



<https://ninelab.org.cn/>

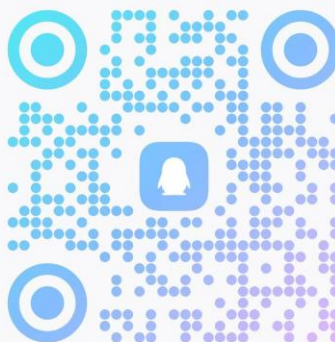


微信公众号: **南苏智慧网络实验**



Ninelab-5G通信...

群号: 976093185



扫一扫二维码, 加入群聊

