



# 去蜂窝大规模MIMO网络中的物联网海量接入 —— 云计算 vs 边缘计算

北京理工大学 高镇 柯玛龙

[gaozhen16@bit.edu.cn](mailto:gaozhen16@bit.edu.cn)

<https://gaozhen16.github.io>

2021年11月15日



1

研究背景

2

研究内容

3

所提方案

4

仿真结果



## □ 物联网应用的主要特征及技术需求<sup>[1]</sup>

- 连续广域覆盖

提供**无处不在**，**均匀一致**的优质服务

- 低功耗大连接

支持**百万/平方公里**的连接密度

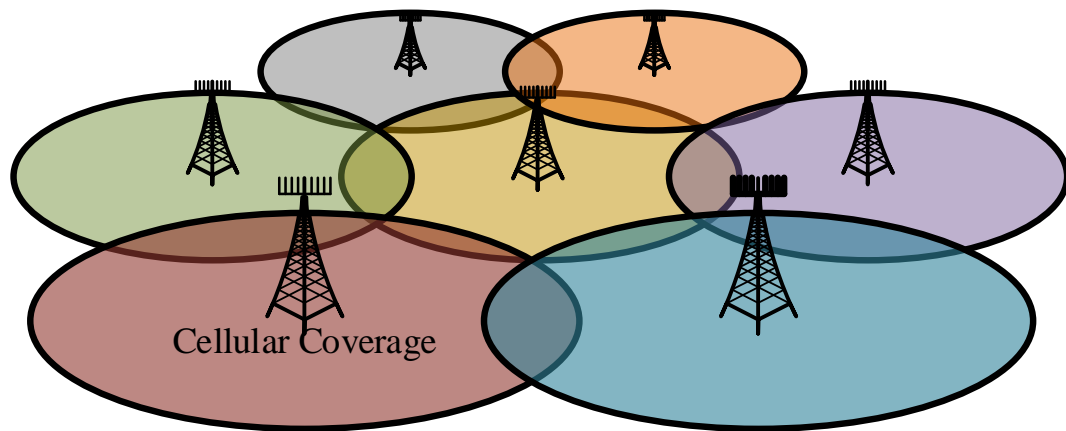
- 低时延高可靠

实现**毫秒级**端到端时延，**接近100%**业务可靠性保证



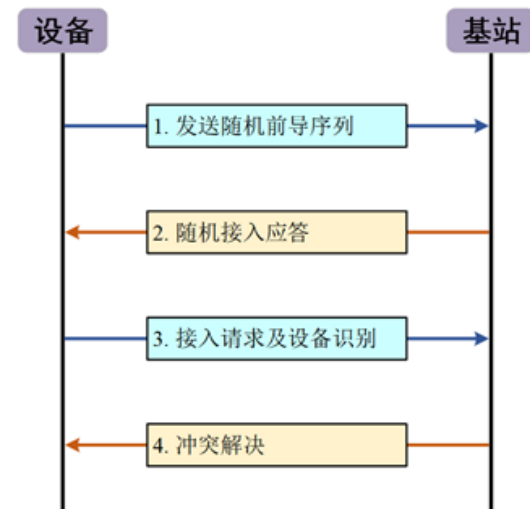
[1] X. Chen, D. W. K. Ng, W. Yu, E. G. Larsson, N. A. Dhahir, R. Schober, "Massive access for 5G and beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 3, pp. 615-637, Mar. 2021.

## □ 传统网络的局限性<sup>[2]</sup>



- **集中式**大规模MIMO + 超密集组网

- 小区中心和小区边缘服务不一致
- 多小区缺乏协作，小区间干扰严重
- 基站密集部署，网络部署成本高



- **授权的**随机接入协议+**正交**资源分配

- 复杂的信令交互流程，接入时延高
- 可容纳设备数量受限于正交资源数
- 设备间接入冲突严重，系统可靠性低

[2] **M. Ke, Z. Gao** et al., “An edge computing paradigm for massive IoT connectivity over high-altitude platform networks,” accepted by *IEEE Wireless Commun.*, Jun. 2021.

1

研究背景

2

研究内容

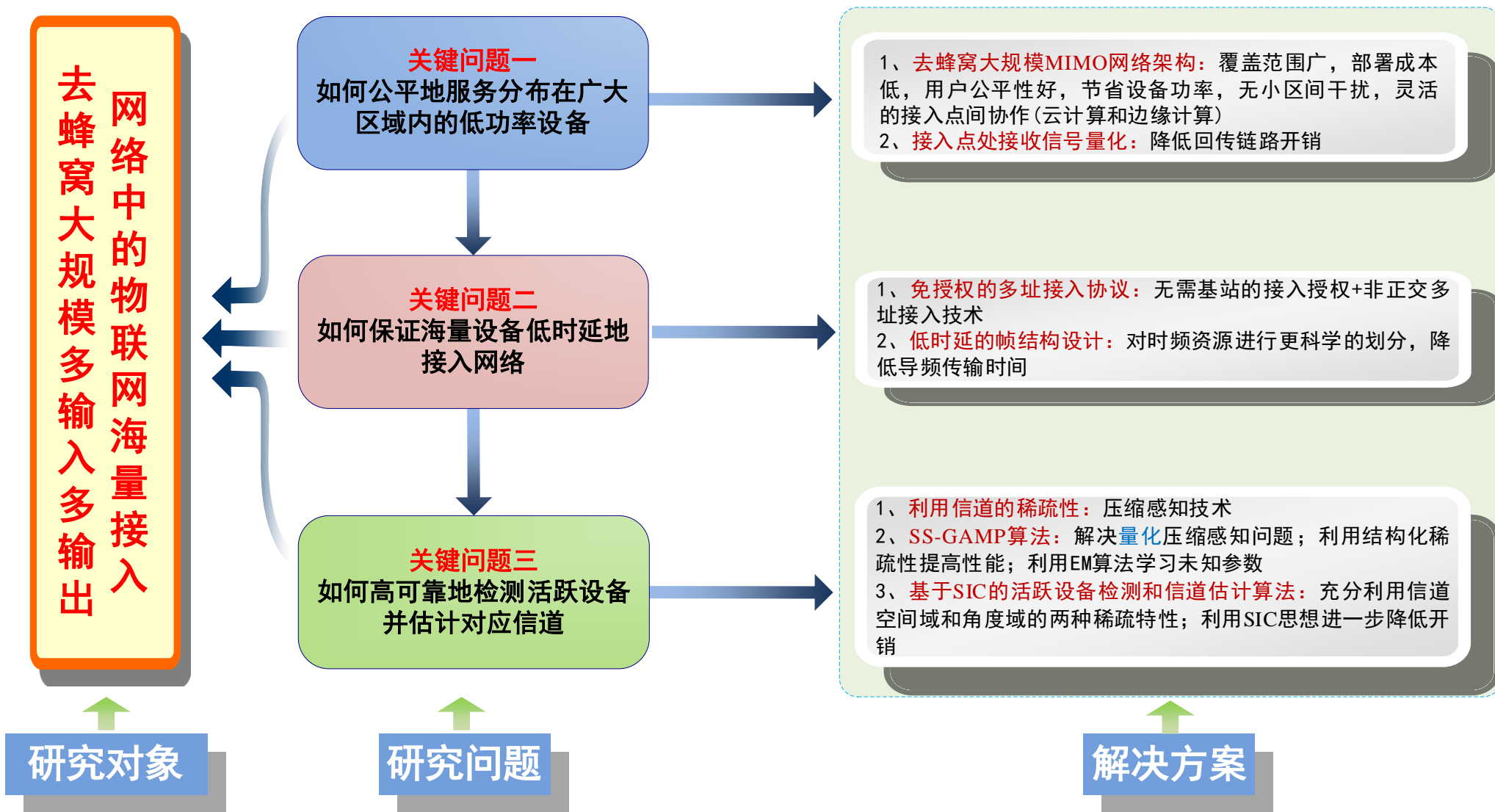
3

所提方案

4

仿真结果





1

研究背景

2

研究内容

3

所提方案

4

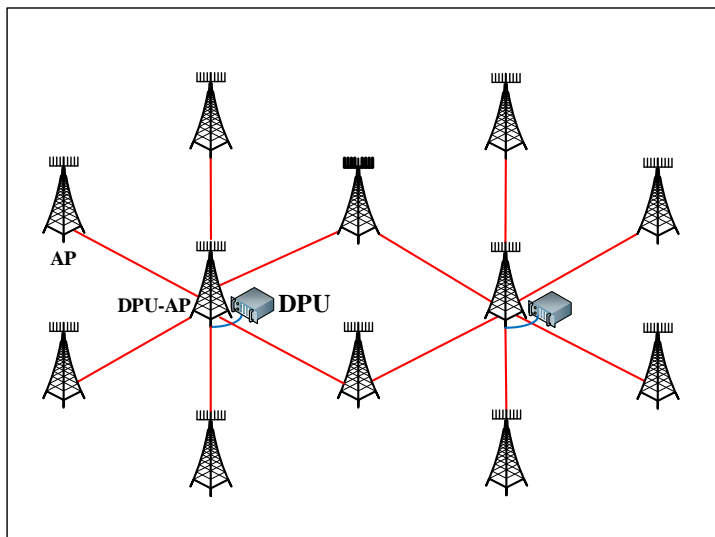
仿真结果



- 网络中**分布式**部署大量AP，为**广域分布**的所有设备提供**均匀一致的服务**
- 每个AP上都配备了**大规模天线阵列**，提供**丰富的空间自由度**
- 所有AP连接到相应的处理单元，可实现**灵活的AP间协作**，有效**避免小区间干扰**

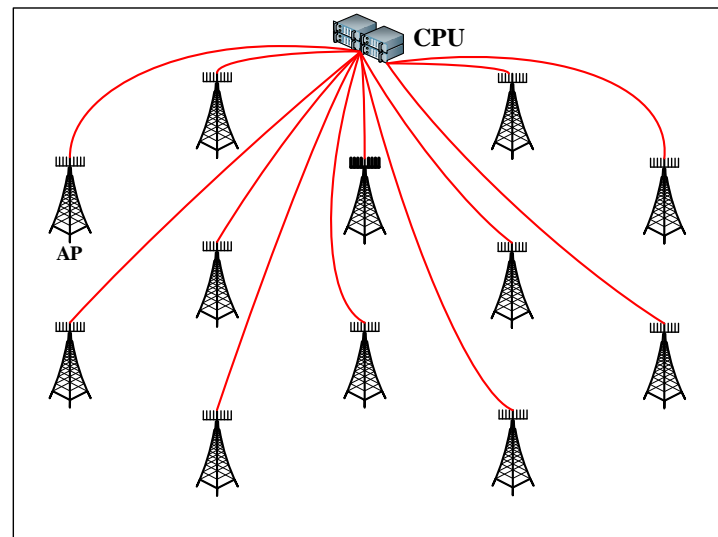
## □ 云计算

- **集中式协作**，CPU和回传链路负载高
- 信号传输距离长，经过多层网络，接入时延高
- AP仅需天线和射频链，网络部署成本低



## □ 边缘计算

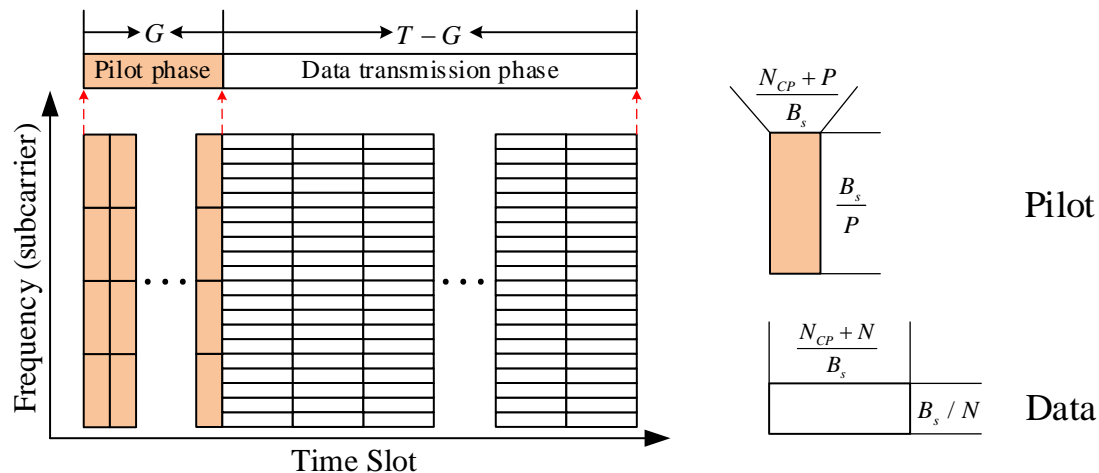
- **分布式协作**，CPU和回传链路负载低
- 信号处理位于网络边缘，接入时延低
- 网络边缘需要额外的DPU，网络部署成本高



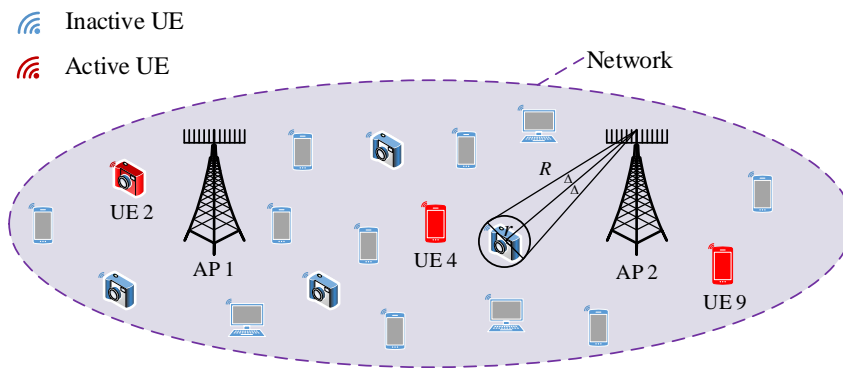


- 步骤1: 活跃设备**无需接入授权**, 直接上行发送**非正交导频**及载荷数据
- 步骤2: 各个AP将接收信号进行**量化**后发送至对应的处理单元
- 步骤3: **联合处理**来自多个AP的信号, 处理单元检测活跃设备并估计其信道

## □ 上行帧结构



- CP-OFDM, 将时频资源划分成多个资源单元, 所有设备使用**相同的时频资源**
- **时域**上分为导频传输和数据传输两个阶段
- **频域**上导频和数据采用**不同的子载波间隔**
- 导频符号传输时间**远小于**数据符号传输时间, 可显著**降低接入时延**



物联网海量连接场景

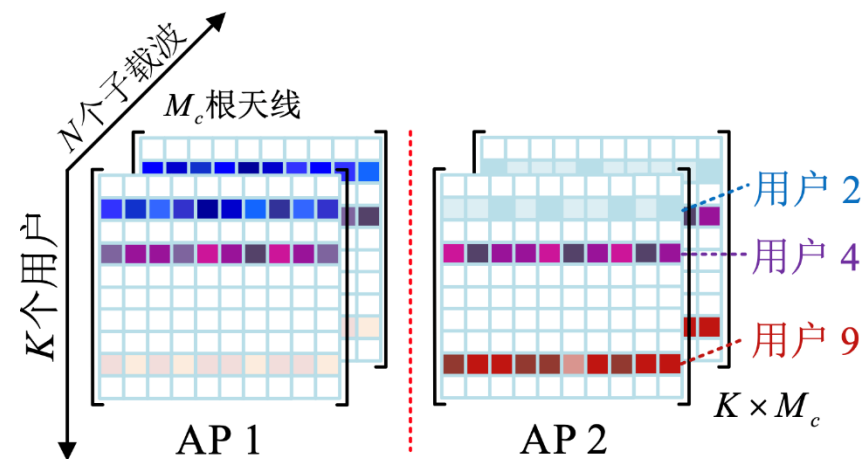
## □ AP处接收信号模型

$$\begin{aligned}\mathbf{Y}_{p,b} &= \sum_{k=1}^K s_{p,k} \sqrt{P_k} \alpha_k \mathbf{h}_{p,b,k}^T + \mathbf{N}_{p,b} \\ &= \mathbf{S}_p \mathbf{H}_{p,b} + \mathbf{N}_{p,b}, \quad \forall p \in [P] \text{ and } \forall b \in [B],\end{aligned}$$

- $K$ 为总的设备数量,  $P$ 为导频子载波数量,  $B$ 为AP数量
- 设备具有**稀疏的上行流量**
- $P_k$  为设备发送功率,  $\alpha_k$  为设备活跃因子
- $\mathbf{h}_{p,b,k}$  为设备与AP间的MIMO信道, 考虑**单环信道模型**
- $\mathbf{S}_{p,k}$  为设备**非正交导频**序列, 服从标准复高斯分布

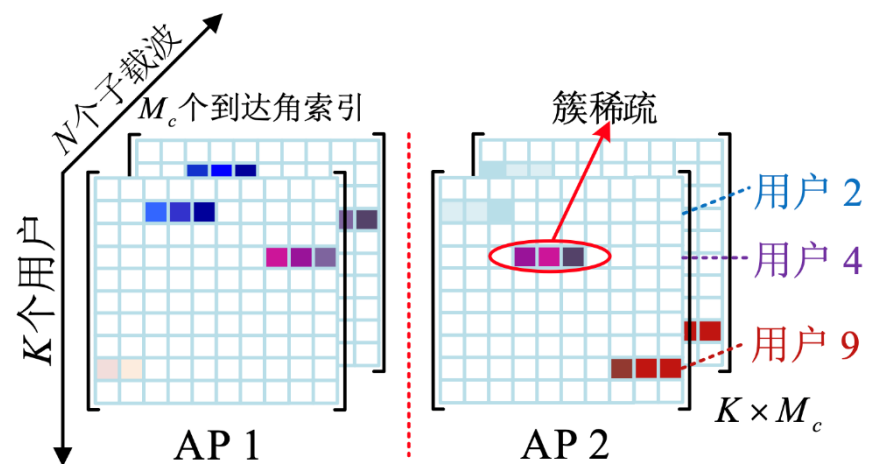
## □ 信道矩阵空间域结构化稀疏性

- 零星的上行流量，信道矩阵各列具有稀疏性
- 在不同天线和子载波上观察到**相同的稀疏图样**
- 异构路径损耗，与不同AP相关联的列具有**近似共同支撑集**
- 上述稀疏结构有利于**提高活跃设备检测性能**



## □ 信道矩阵角度域结构化稀疏性

- 零星的上行流量，信道矩阵各列具有稀疏性
- 不同子载波上的稀疏图样相同，**不同天线间的稀疏结构被破坏**
- 信道矩阵呈现**增强的簇稀疏**特性
- 上述稀疏结构有利于**提高信道估计性能**



## □ 云计算模型

- 空间域活跃设备检测(空间域信道矩阵非零行检测)

$$\bar{\mathbf{Y}}_p = \underbrace{[\bar{\mathbf{Y}}_{p,1}, \bar{\mathbf{Y}}_{p,2}, \dots, \bar{\mathbf{Y}}_{p,B}]}_{\text{AP处量化接收信号}} = \mathbf{S}_p \overset{\text{空间域信道矩阵}}{\mathbf{H}_p} + \underset{\text{量化误差}}{\mathbf{N}_p^q} + \mathbf{N}_p,$$

- 角度域信道估计(对应角度域信道矢量估计)

$$\mathbf{R}_p = [\mathbf{S}_p]_{:, \hat{\mathcal{A}}} \overset{\text{角度域信道矩阵}}{[\mathbf{W}_p]_{\hat{\mathcal{A}}, :}} + \underset{\text{AWGN, 量化误差, 活跃设备估计误差}}{\tilde{\mathbf{N}}_p},$$

估计的活跃用户集合

## □ 边缘计算模型

- 空间域活跃设备检测

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{Y}}_{p,i} &= [\bar{\mathbf{Y}}_{p, \mathcal{B}_i(1)}, \bar{\mathbf{Y}}_{p, \mathcal{B}_i(2)}, \dots, \bar{\mathbf{Y}}_{p, \mathcal{B}_i(N_{co})}] \\ &= \mathbf{S}_p [\mathbf{H}_p]_{:, \mathcal{M}_i} + [\mathbf{N}_p^q]_{:, \mathcal{M}_i} + [\mathbf{N}_p]_{:, \mathcal{M}_i}, \end{aligned}$$

与第i个AP相关联的天线索引

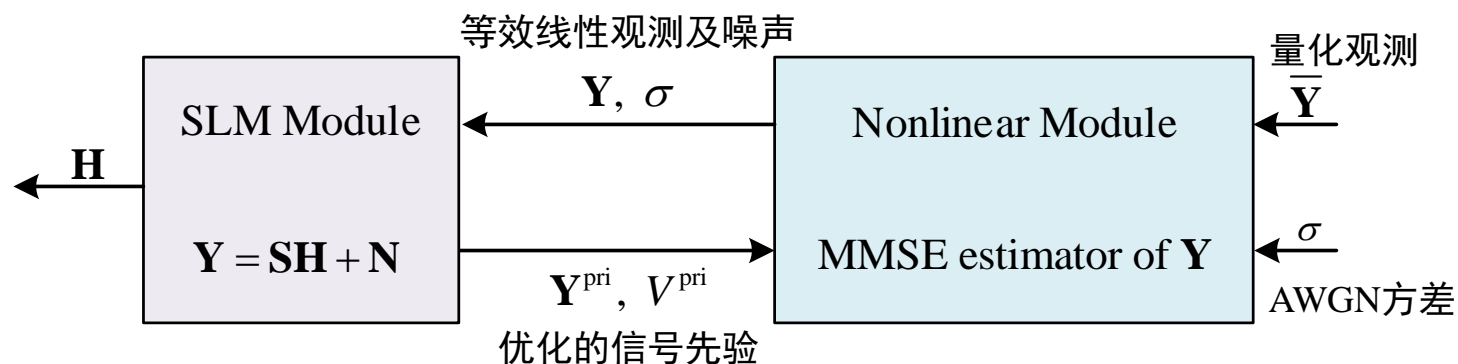
- 角度域信道估计

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{p,i} &= [\mathbf{R}_{p, \mathcal{B}_i(1)}, \mathbf{R}_{p, \mathcal{B}_i(2)}, \dots, \mathbf{R}_{p, \mathcal{B}_i(N_{co})}] \\ &= \mathbf{S}_p [\mathbf{W}_p]_{:, \mathcal{M}_i} + [\bar{\mathbf{N}}_p^q]_{:, \mathcal{M}_i} + [\bar{\mathbf{N}}_p]_{:, \mathcal{M}_i}. \end{aligned}$$

上述问题均可建模为量化的压缩感知问题

## □去量化的贝叶斯推理框架<sup>[3]</sup> (SS-GAMP算法)

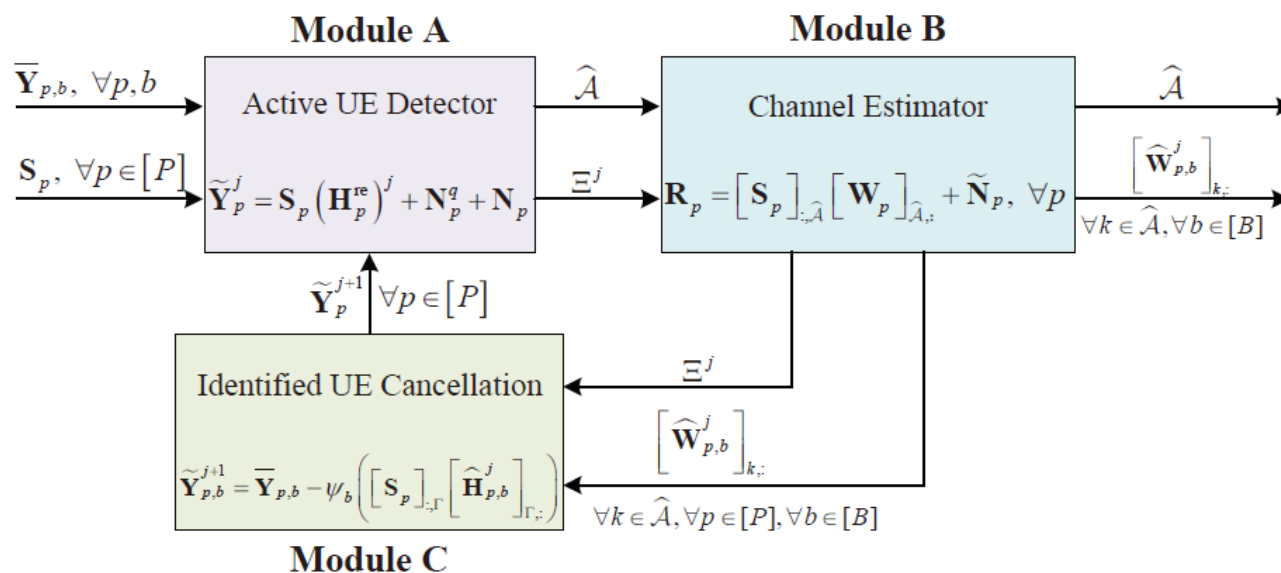
- 一般化的贝叶斯推理框架，解决**量化压缩感知重构问题**
- 由两个模块组成：非线性模块和线性模块
- 非线性模块求解原始接收信号 $\mathbf{Y}$ 的MMSE估计，将问题转化为**等效线性模型**
- 线性模块利用传统AMP算法求解信道矩阵的估计，并**优化 $\mathbf{Y}$ 的先验**
- 两个模块交替迭代，直至收敛
- 线性模块利用**信道矩阵的稀疏结构**提高检测与估计性能
- 相比于传统的AMP算法，所提框架可**显著提高低分辨率量化下的重构性能**



[3] **M. Ke, Z. Gao** et al, "Massive access in cell-free massive MIMO-based Internet of Things: Cloud computing and edge computing paradigms," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39. no. 3, pp. 756-772, Mar. 2021.

## □ 基于SIC的活跃设备检测与信道估计算法<sup>[3]</sup>

- 模块A将SS-GAMP算法应用于空间域模型，获得两个可靠性不同活跃用户集合
- 模块B根据粗糙的活跃用户集合估计(低漏检)，将SS-GAMP算法应用于角度域模型进行信道估计
- 模块C从可靠的活跃用户集合估计(低虚警)中选取部分用户，并将该用户的信号消除
- 三个模块交替迭代直至收敛
- 相比于空间域联合的检测与估计算法，所提算法可显著降低导频开销



1

研究背景

2

研究内容

3

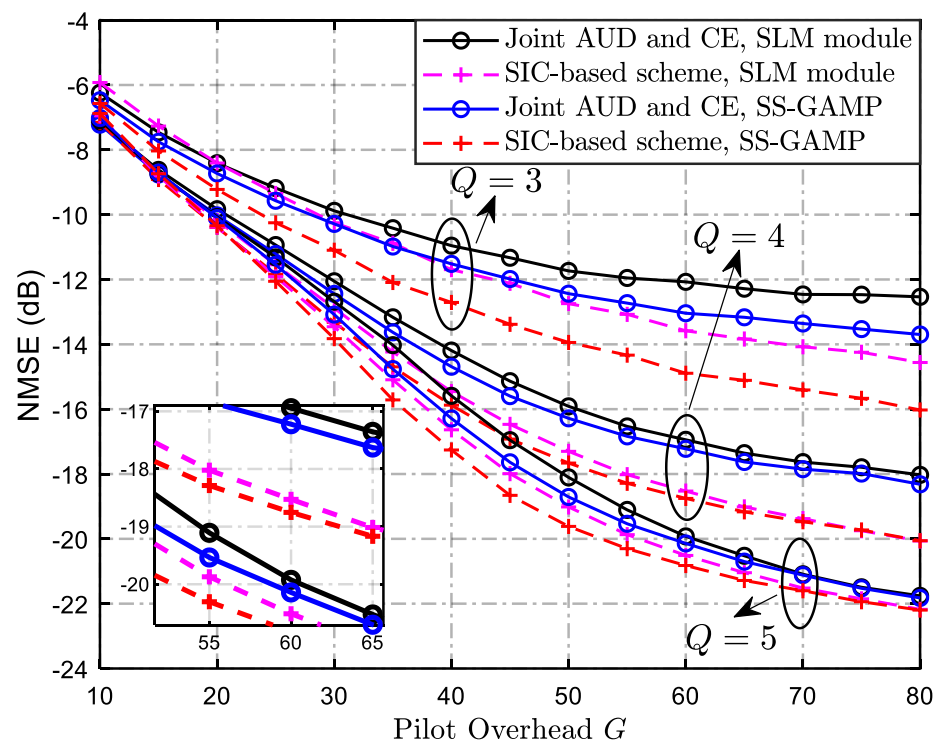
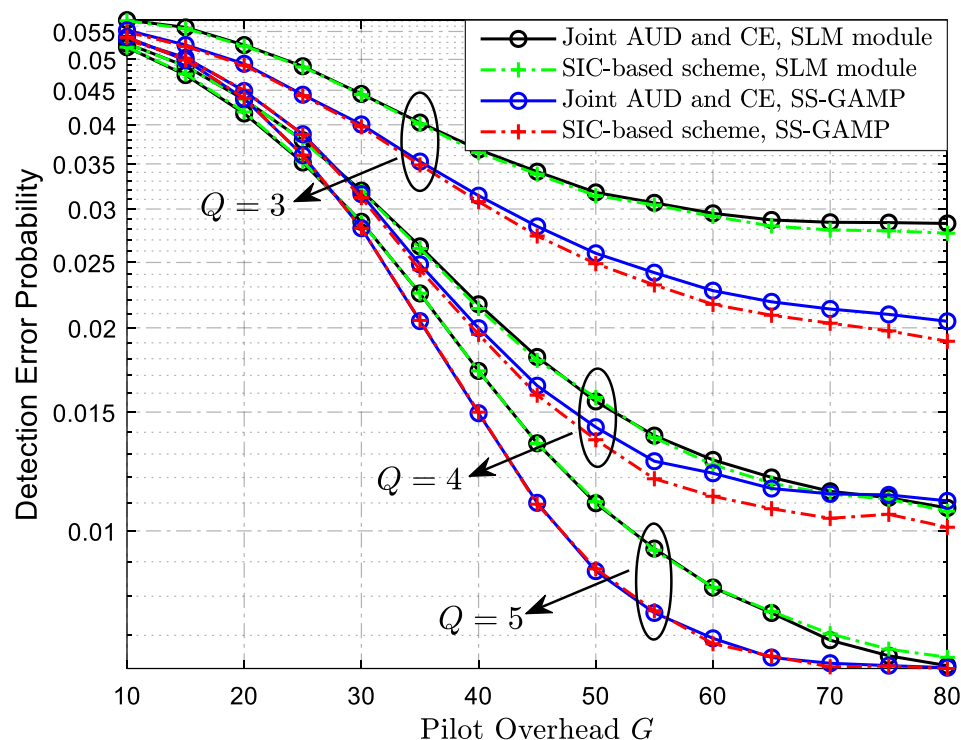
所提方案

4

仿真结果



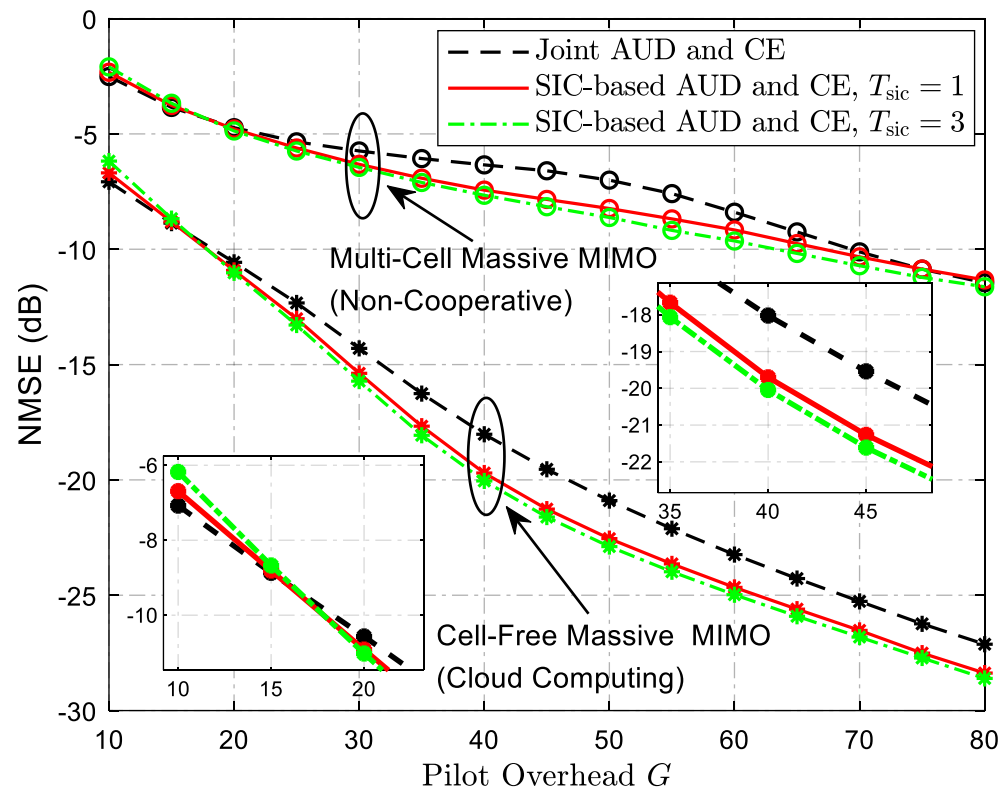
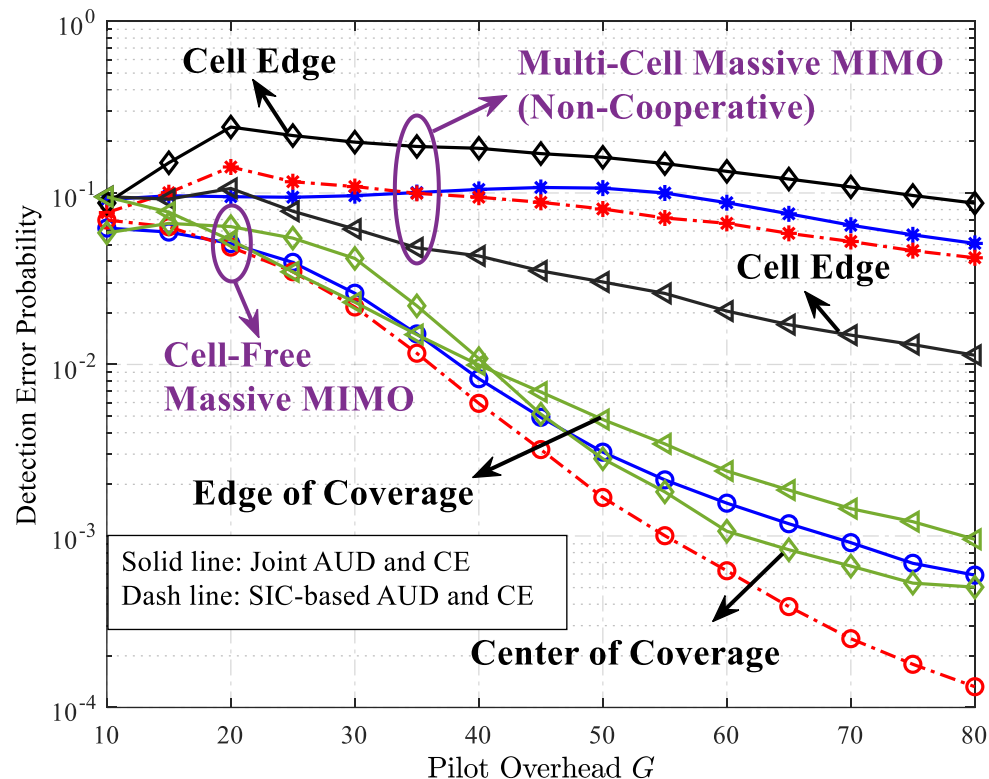
- 去量化贝叶斯推理框架 vs 将量化误差当成噪声
- 基于SIC的交替迭代算法 vs 基于空间域的联合估计算法
- 2800个设备，其中140个活跃设备；7个AP，每个AP配备16根天线； $Q$ 比特回传量化



- ✓ 去量化贝叶斯推理框架可有效对抗低比特量化所带来的性能损失
- ✓ 基于SIC的交替迭代算法可显著提高检测与估计性能

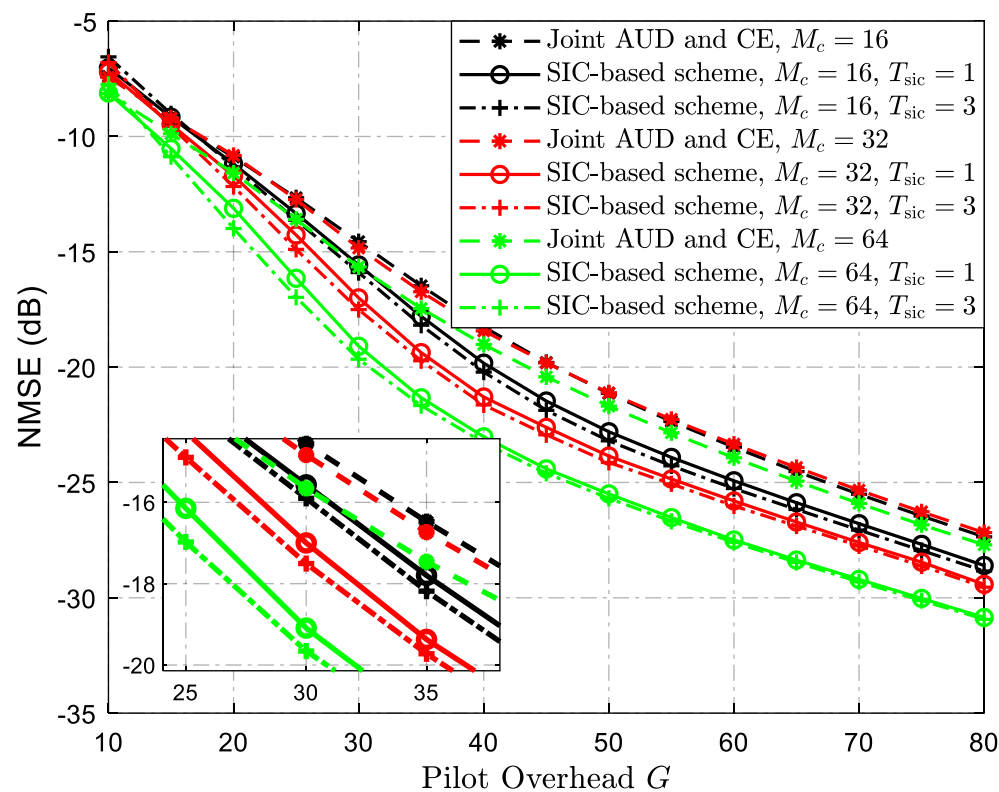
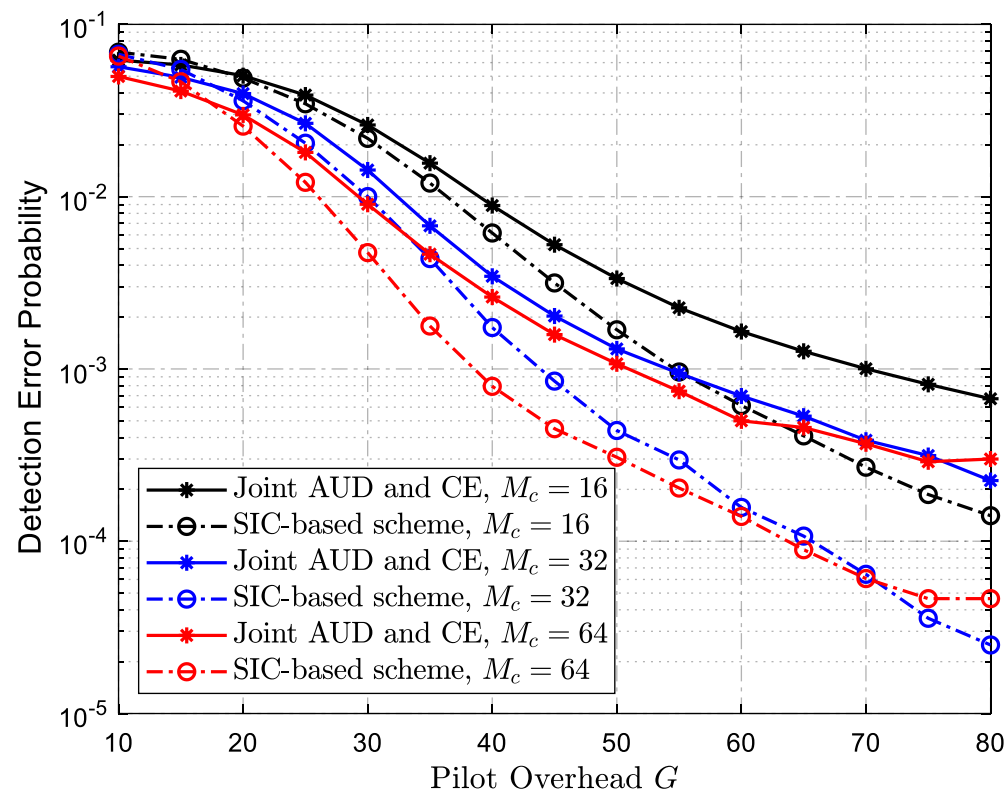


- 基线方案：多小区集中式大规模MIMO网络
- 小区中心 vs 小区边缘



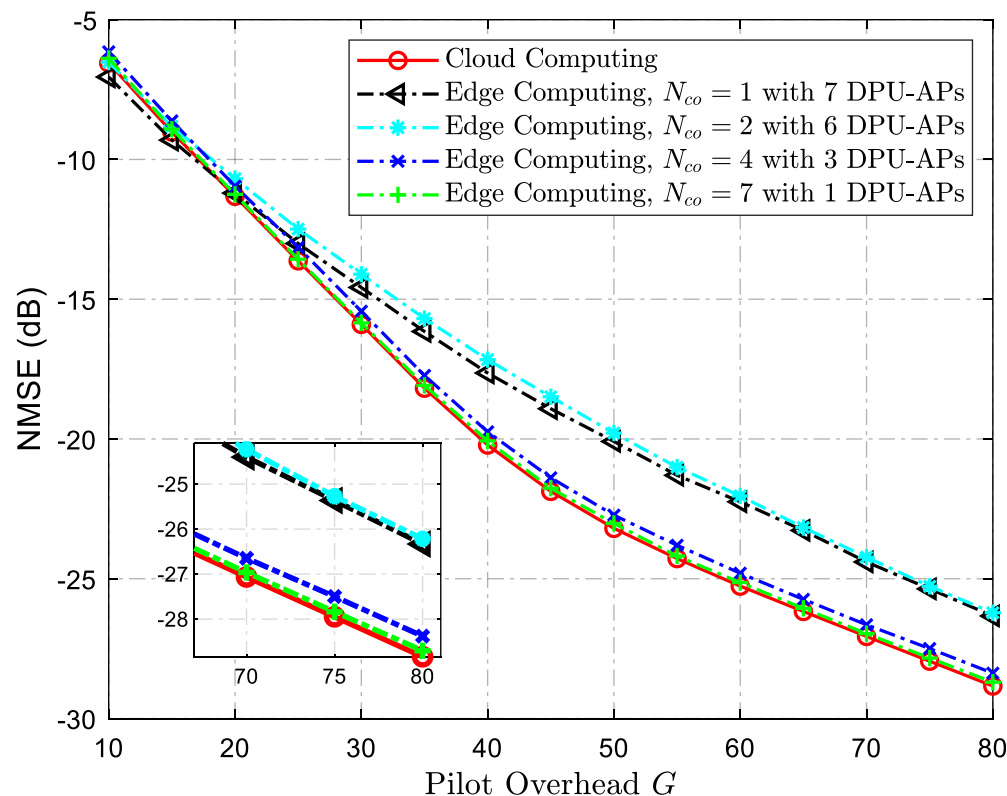
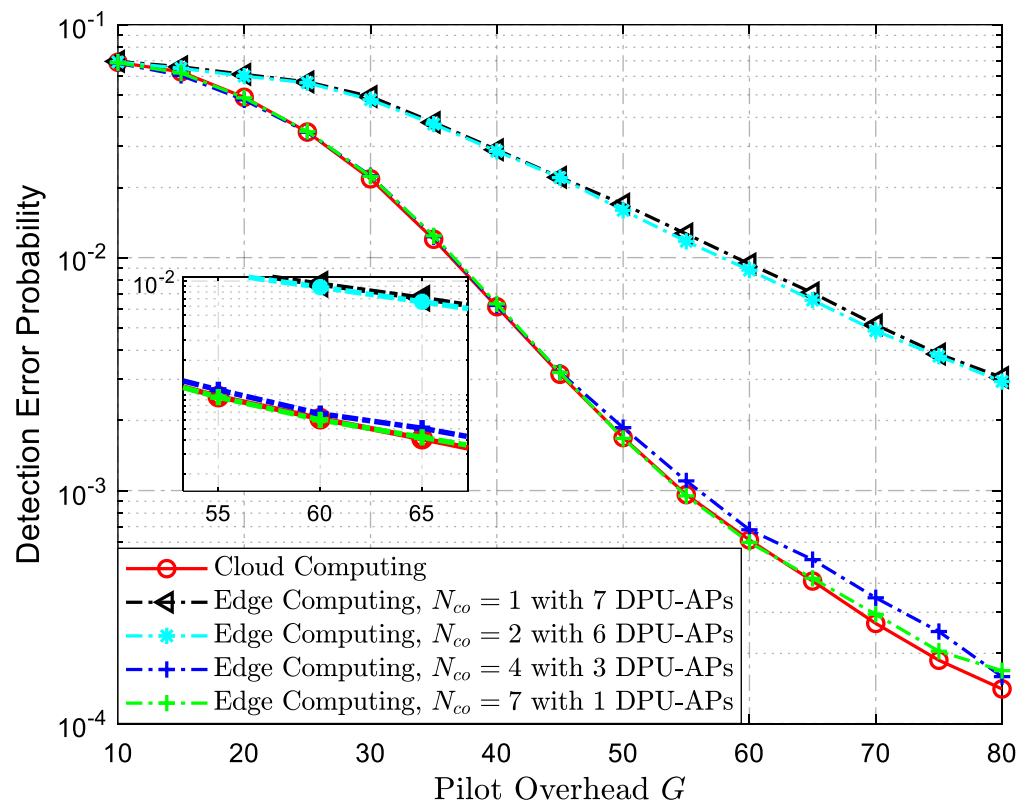
- ✓ 去蜂窝大规模MIMO网络可有效避免小区内干扰
- ✓ 小区中心和小区边缘的设备可获得均匀一致的服务

➤ 关键参数：每个AP上的天线数量



✓ 增加AP天线数量可进一步提高活跃设备检测和信道估计性能

➤ 关键参数：协作AP数量，部署的DPU数量



- ✓ 增加协作AP数量，边缘计算性能趋近于云计算性能
- ✓ 边缘计算支持更灵活的AP协作，更低的接入时延，可降低CPU和回传链路负载
- ✓ 边缘计算网络部署成本更高，需要在性能和成本之间折衷



THANKS!

