



华南理工大学

South China University of Technology

# 可转向天线(Rotatable Antenna, RA) ——智联6G通感未来

**郑倍雄**

华南理工大学

**E-mail: [bxzheng@scut.edu.cn](mailto:bxzheng@scut.edu.cn)**

16<sup>th</sup> September 2025@RISTA前沿大讲堂



# 华南理工大学

South China University of Technology

1

研究背景

2

基本架构

3

应用前景

4

系统模型

5

关键挑战

6

研究进展

7

原型验证

8

总结展望

# 研究背景

## 6G通信愿景：宽带、泛在、智能



智慧交通



智慧工厂



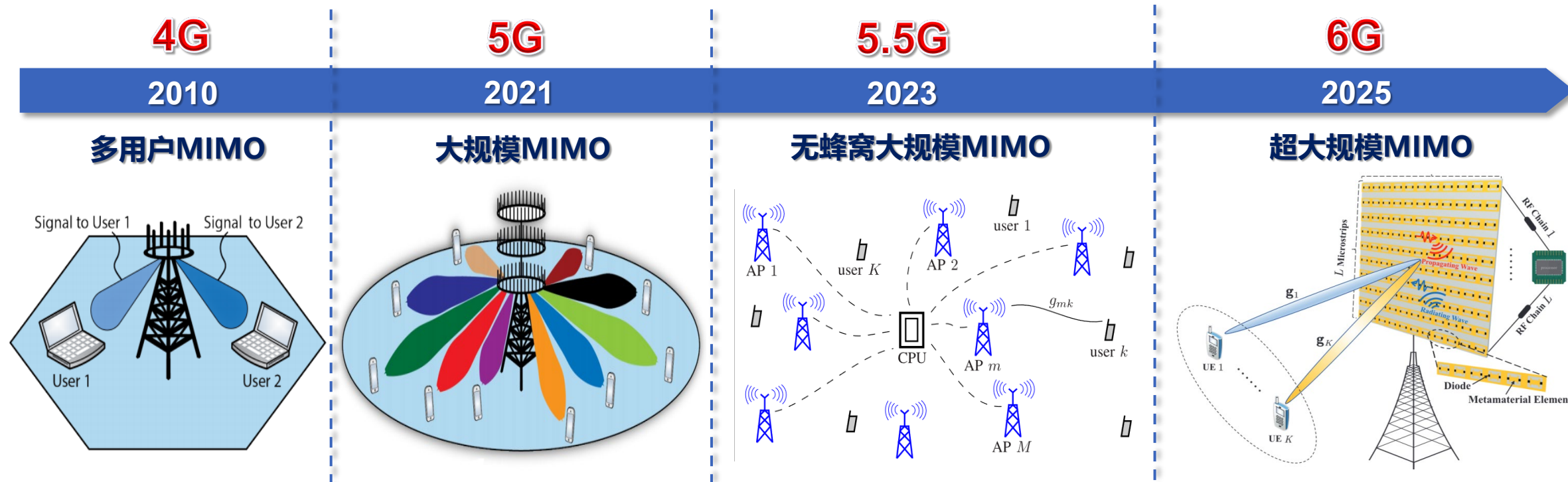
智能家居

### 业务需求

- 超高的数据速率/容量：达到1Tbps
- 超高的可靠性：99.99999%
- 超高的链接密度
- 极广的覆盖范围：天空、海洋和太空
- 极低的时延：小于1毫秒
- 极低的能耗与成本

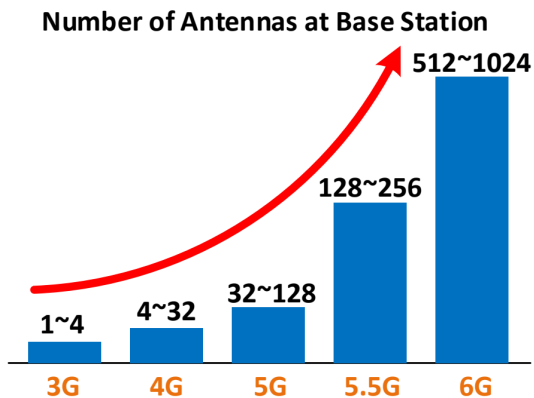
# MIMO发展历程

□多天线技术是支撑未来6G关键应用的核心技术之一

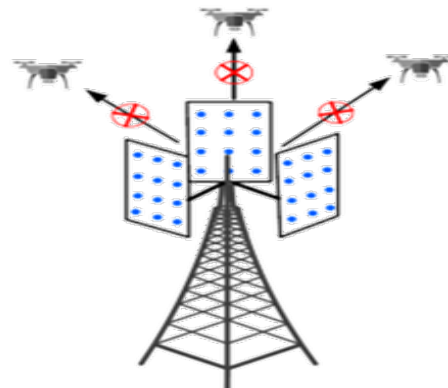


未来多天线技术发展趋势：天线阵列**规模持续扩张**，阵列架构更加多样（集中式/分布式/可移动/可转向），阵列**形态更加灵活部署**

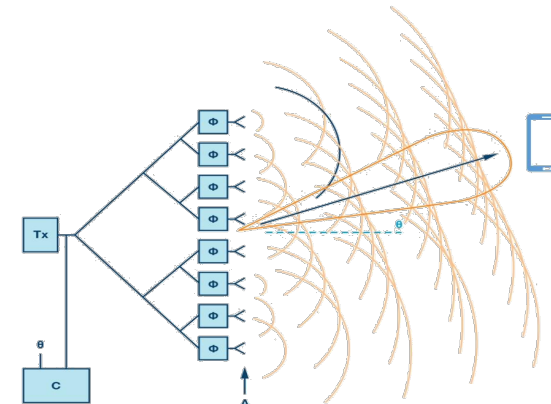
# 现有固定天线存在的不足



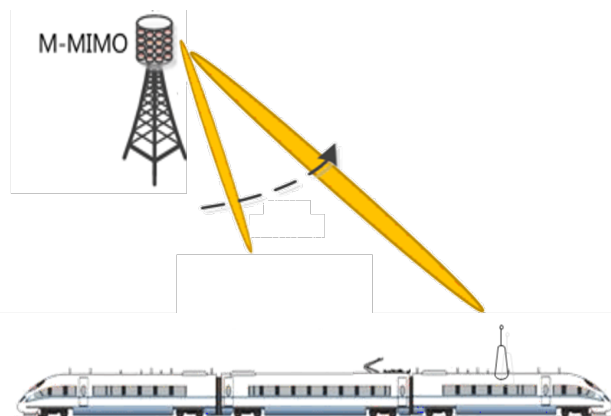
天线成本开销高企



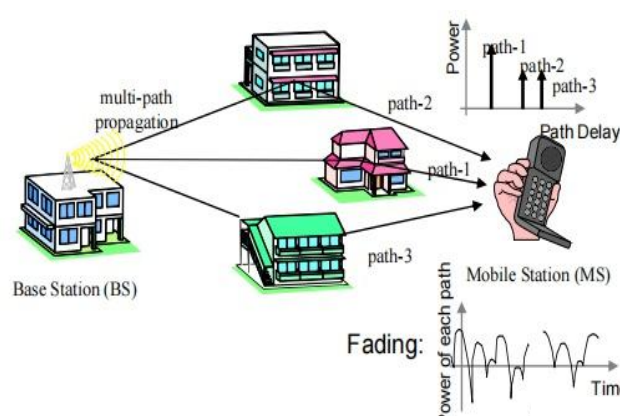
天线空间自由度固化



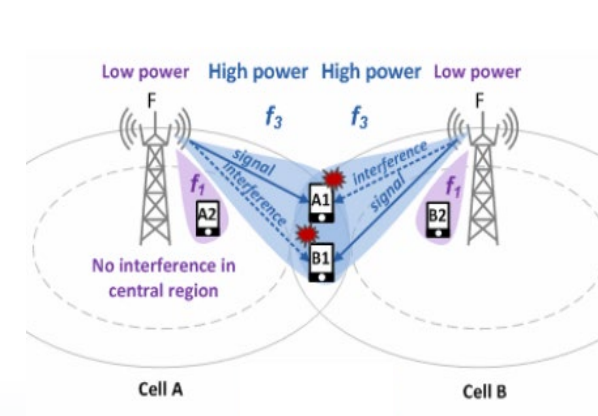
波束控制能力受限



高移动信道适应性差

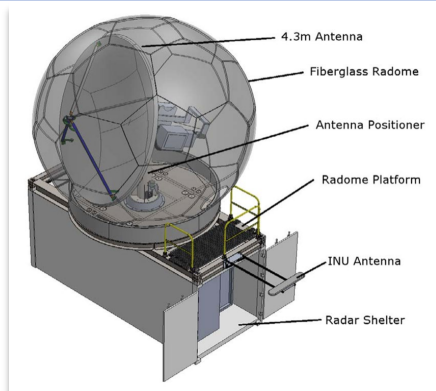


小尺度衰落补偿失效

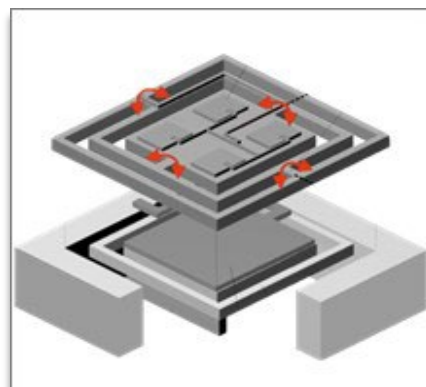


多用户干扰抑制瓶颈

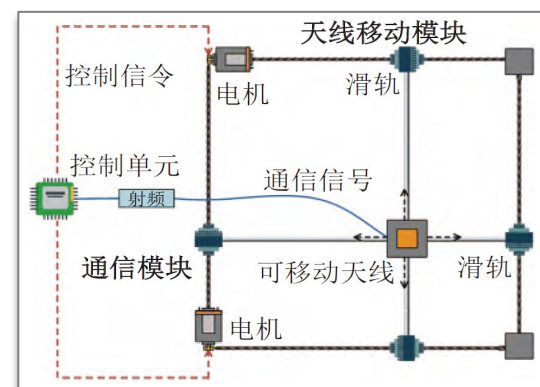
# 灵活天线架构发展历程



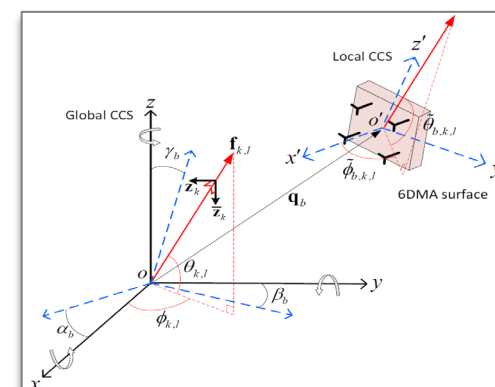
带旋转平台的抛物面天线



出现“可移动天线”定义



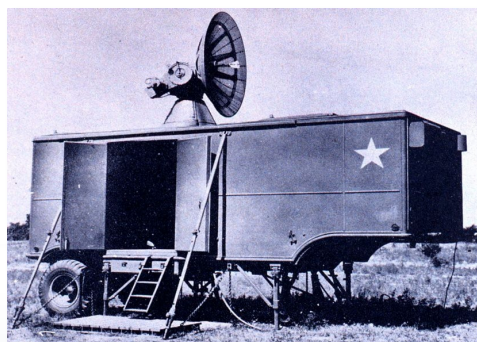
可移动天线(MA)辅助通信



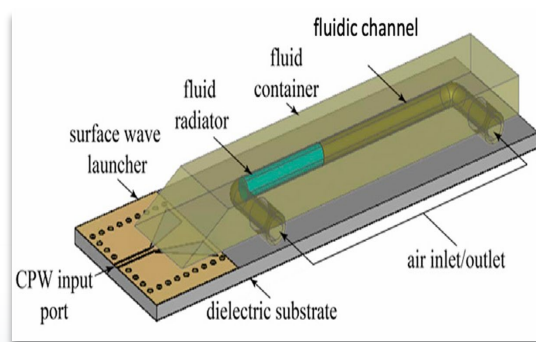
六维可移动天线(6DMA)



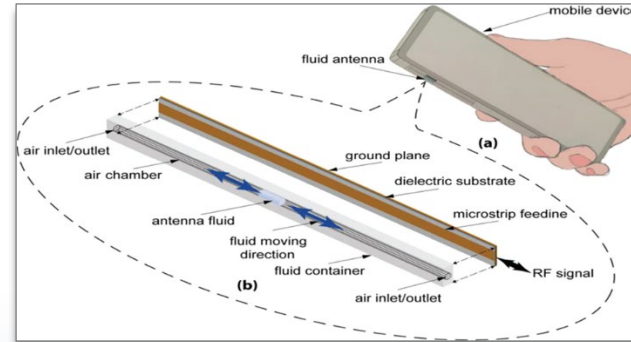
基于旋转天线的机械扫描雷达



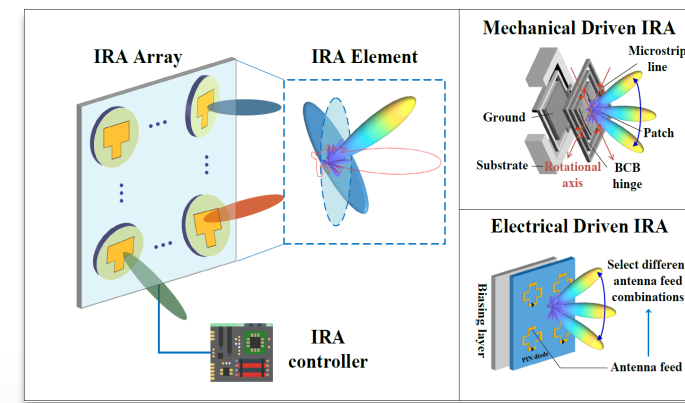
定义流态天线  
(流体/液体电介质辐射器)



定义“流态天线系统(FAS)”  
(天线形状和位置灵活)



可转向天线(Rotatable Antenna, RA)





# 华南理工大学

South China University of Technology

1 研究背景

2 基本架构

3 应用前景

4 系统模型

5 关键挑战

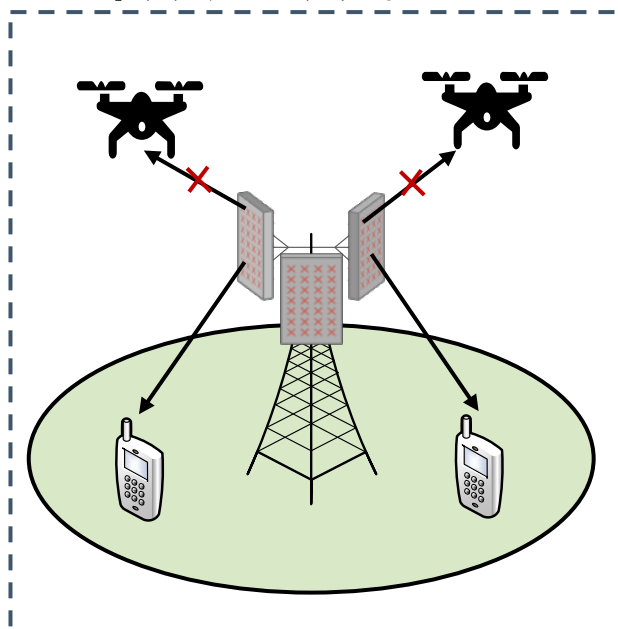
6 研究进展

7 原型验证

8 总结展望

# 系统架构对比

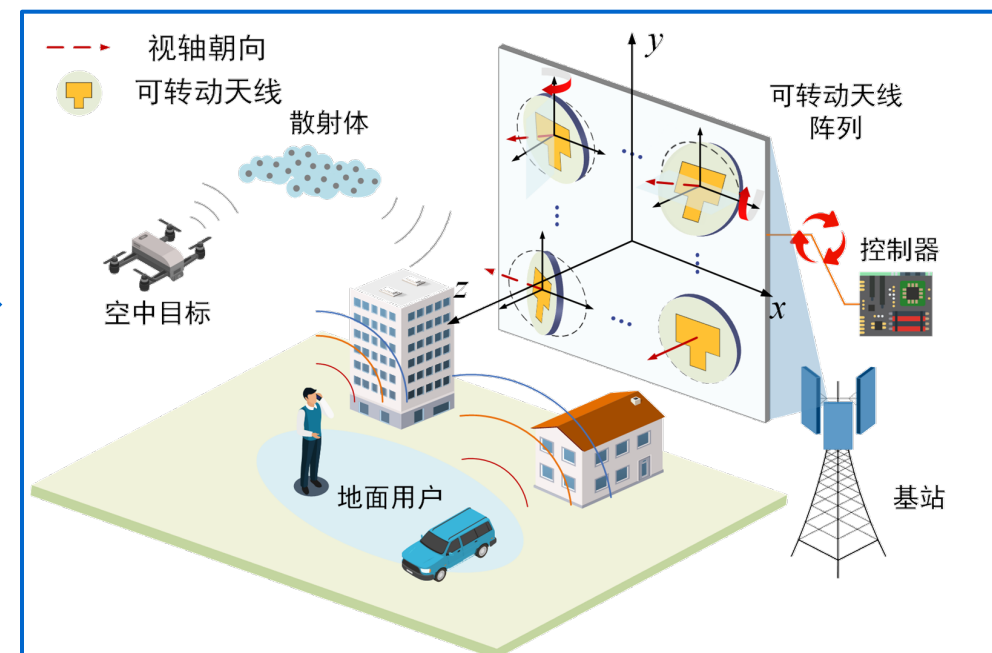
## 传统扇区天线基站



范式改变

从地面覆盖到空  
天地一体网络

## 可转向天线基站

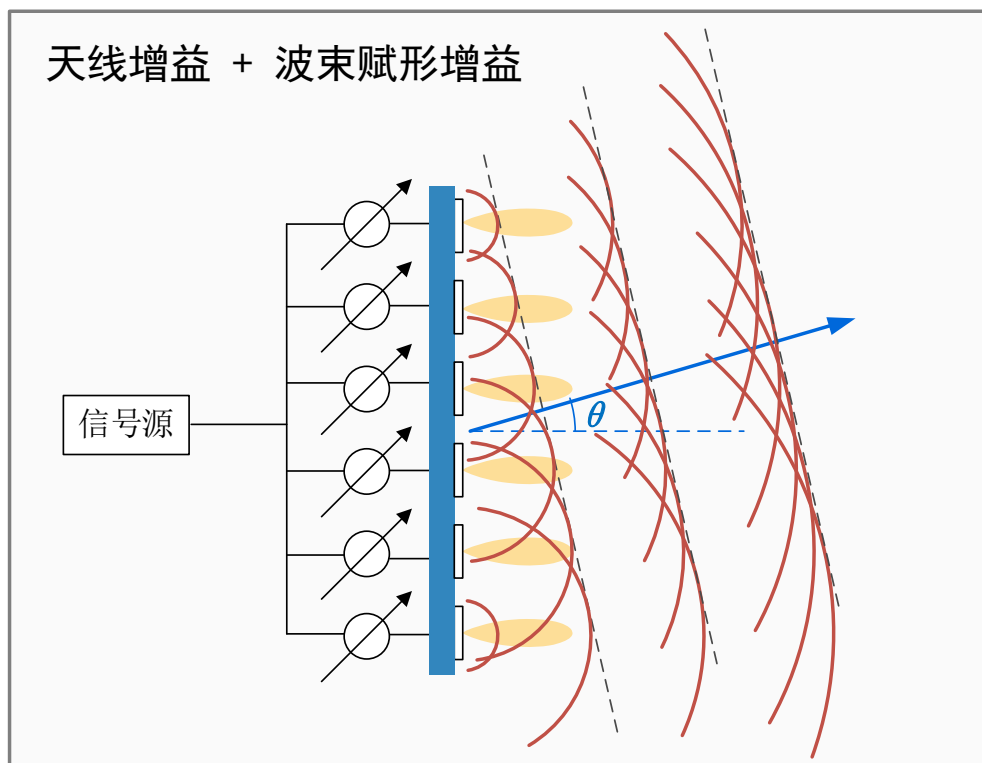


- ✗ 只能支持地面通信，无法覆盖空中场景
- ✗ 难以针对用户/目标分布调控辐射方向
- ✗ 依赖复杂信号处理应对环境干扰问题
- ✗ 难以进一步提升阵列规模，可扩展性差

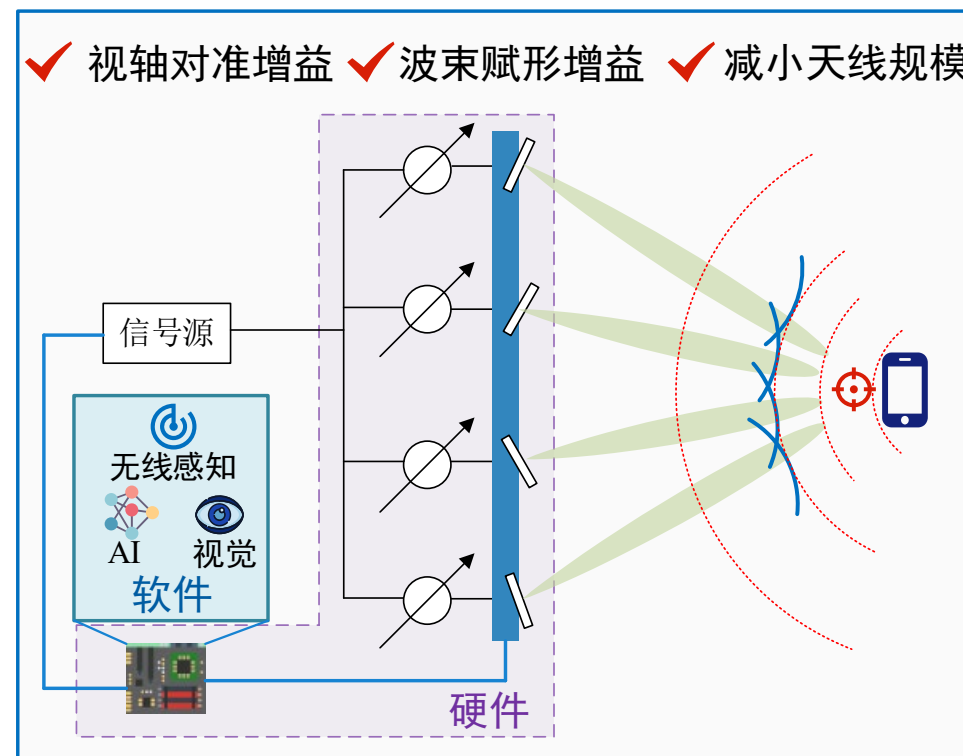
-  主动智能调控辐射方向
-  灵活转向扫描能力
-  充分挖掘阵列空间自由度

# 硬件架构对比

## ● 传统固定多天线波束赋形



## ✓ 可转向天线灵活波束赋形



**通过对系统软件算法（视轴朝向控制算法）与硬件设计（转向控制硬件模块）的一体化设计与深度融合，智能可转向天线架构能够实现环境自主感知与空间定向重构能力**

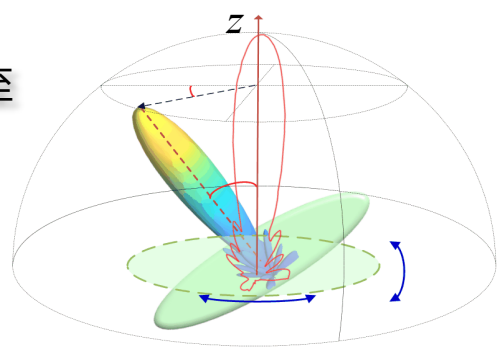
# 硬件基本架构

## □ 天线尺度转动：机械驱动

通过**机械旋转**整个天线来调整其**物理朝向**，从而直接改变天线主瓣的朝向

主瓣旋转至  
( $\theta, \varphi$ )

天线进行  
物理旋转



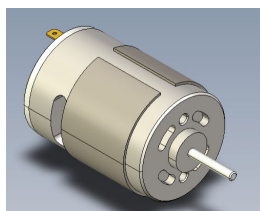
调节范围广

转动精度高

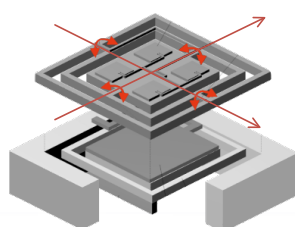
响应速度快

兼容性强

### 实现方法



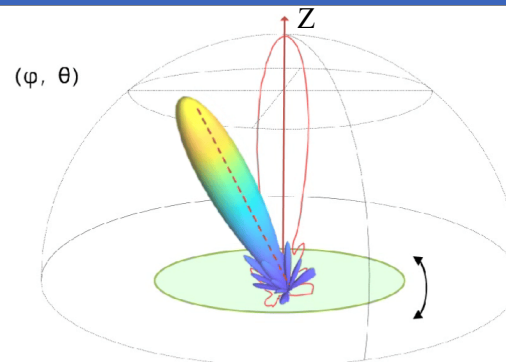
微型电机驱动



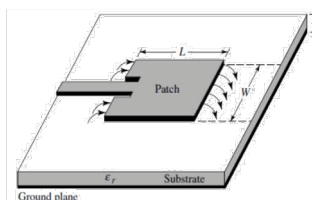
MEMS驱动

## □ 天线尺度转动：电子驱动

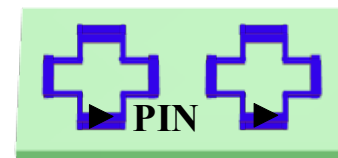
保持天线**物理朝向固定**，通过**电子驱动技术**改变天线的视轴朝向



### 实现方法



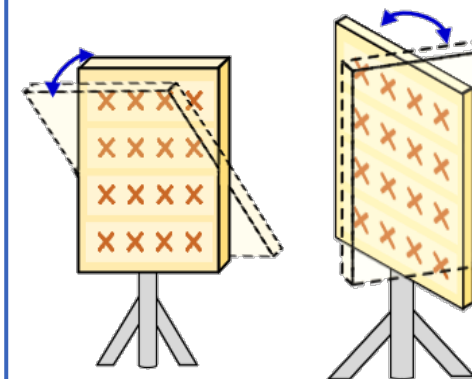
不同馈源  
激励组合



利用电子  
调谐元件

## □ 阵列尺度转动

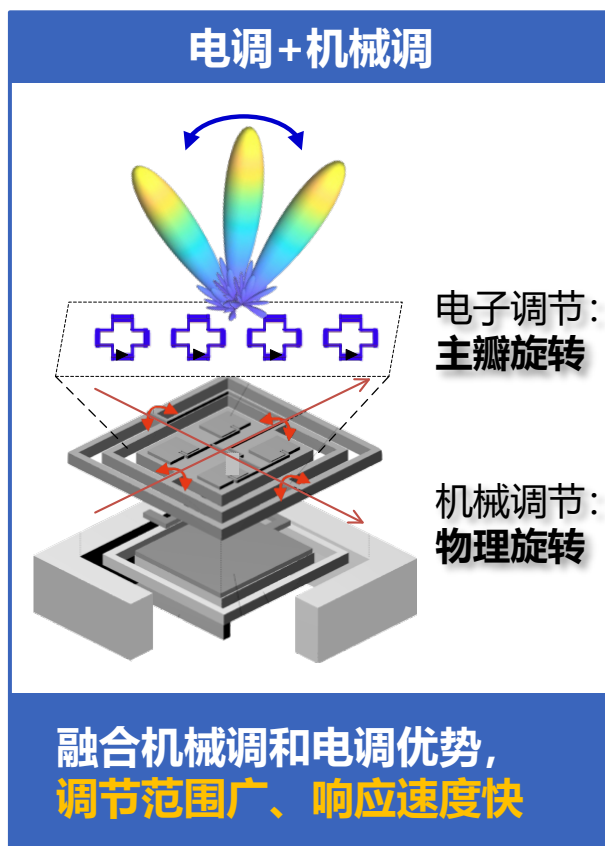
通过**转动**天线阵列，改变阵列整体朝向



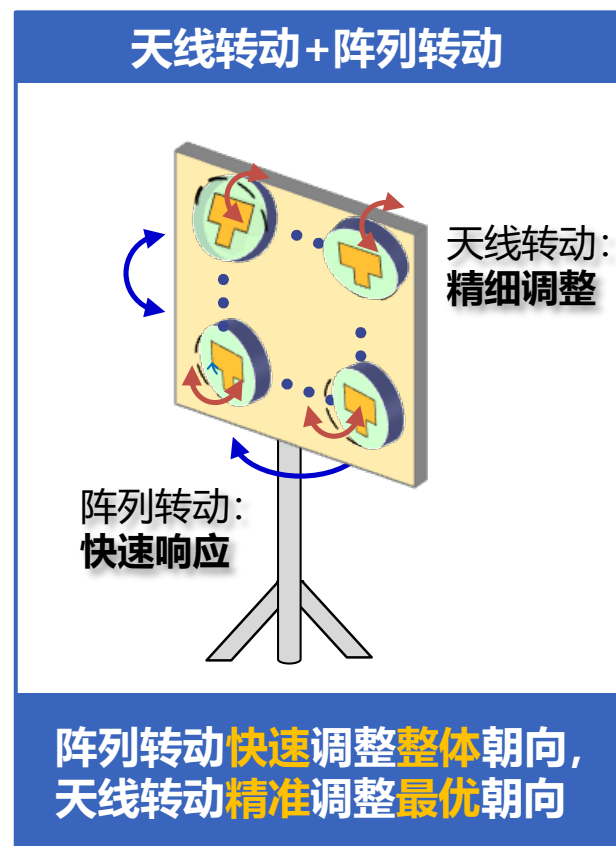
能够**快速调整**多个天线的朝向，但**调节精度和自由度**较低

# 混合硬件架构

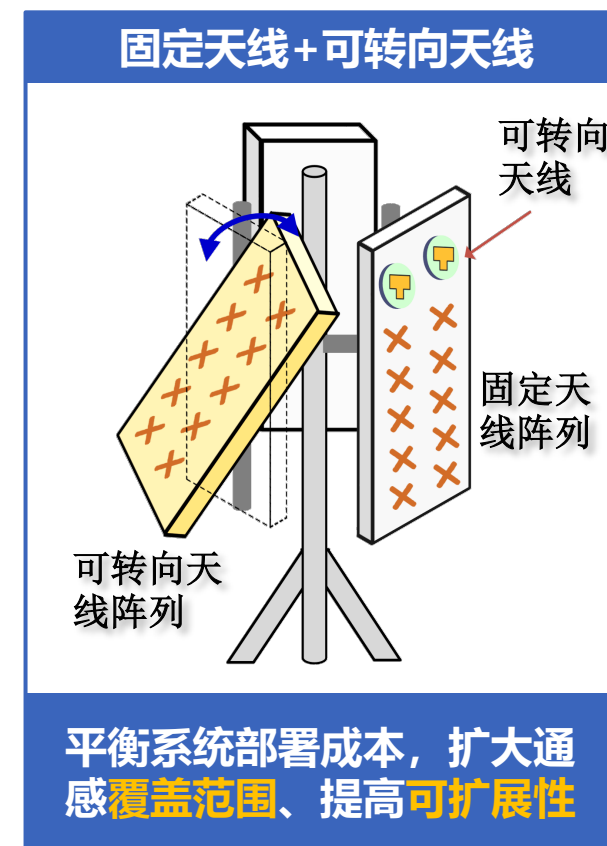
## □ 双模式驱动架构



## □ 双尺度转动架构



## □ 固定/可转向天线混合架构



融合不同转动架构优势, 在通感性能、响应速度、部署成本中取得平衡



# 华南理工大学

South China University of Technology

1 研究背景

2 基本架构

3 应用前景

4 系统模型

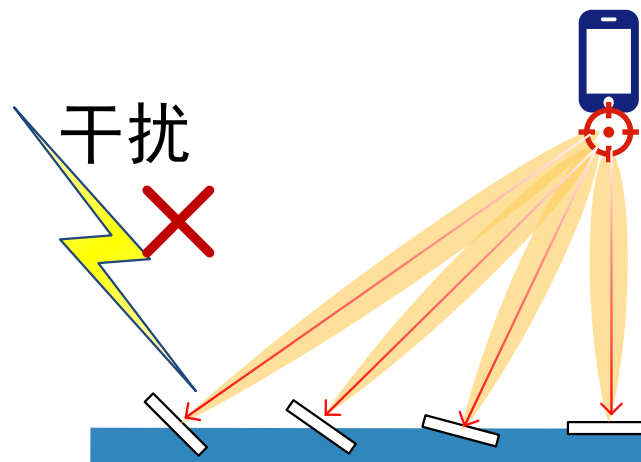
5 关键挑战

6 研究进展

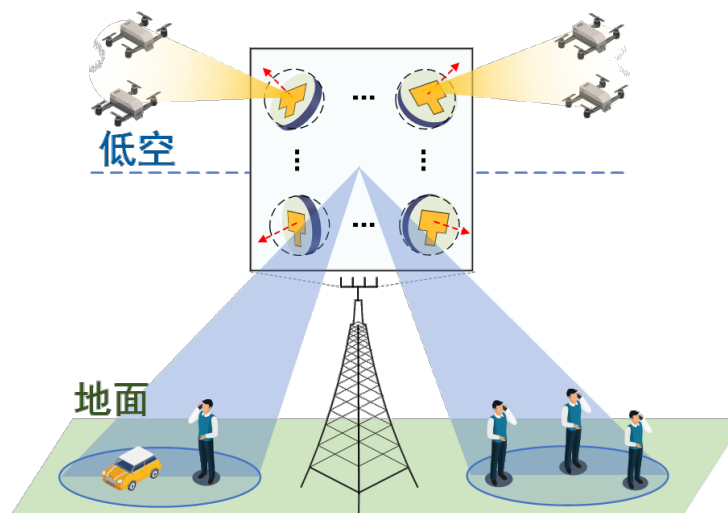
7 原型验证

8 总结展望

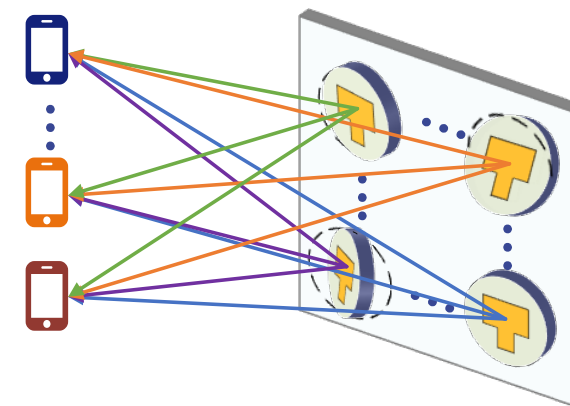
# 性能优势



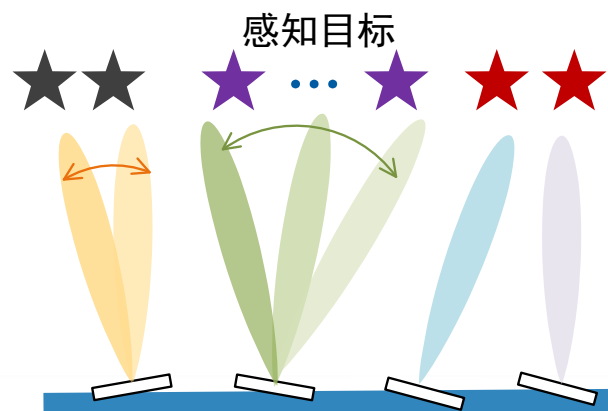
干扰规避



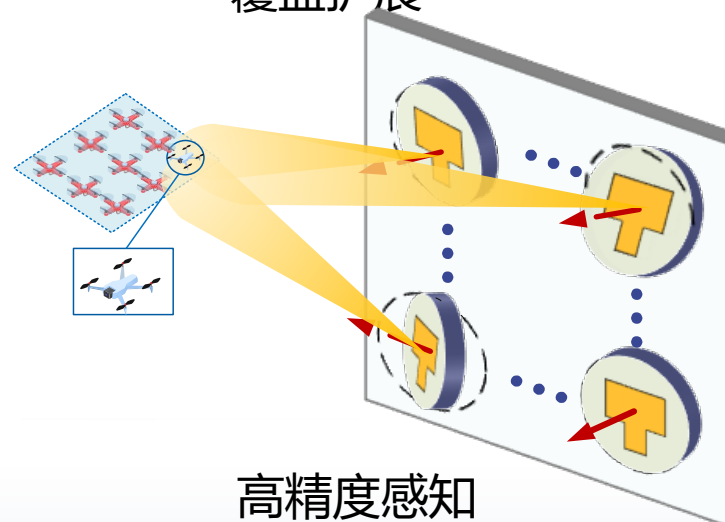
覆盖扩展



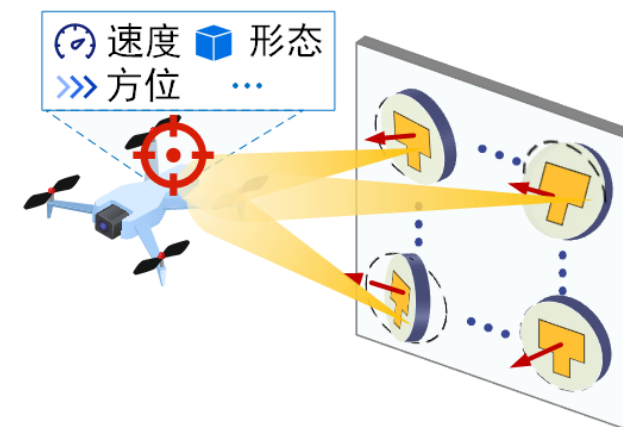
空间复用



多目标感知



高精度感知

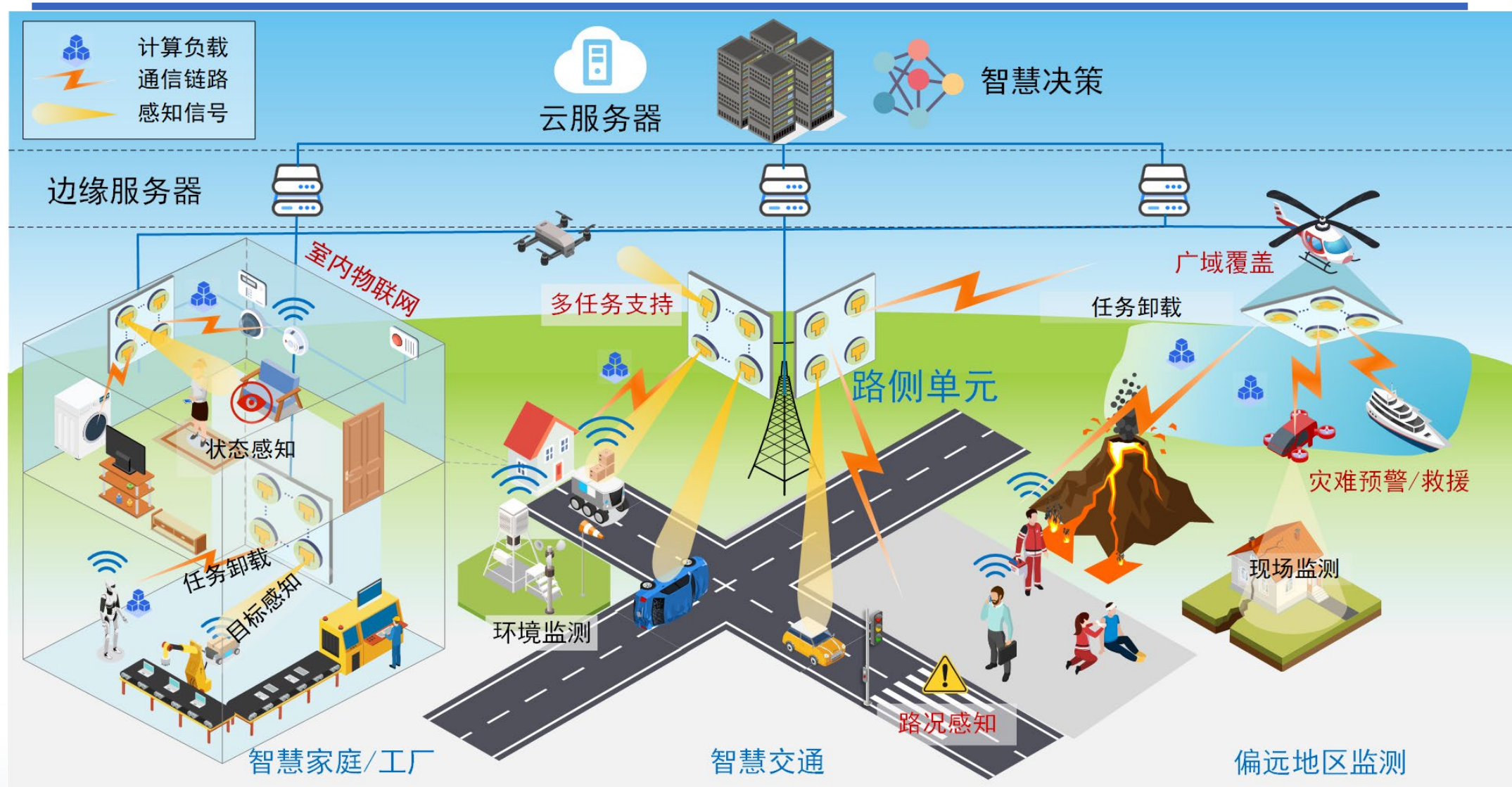


多维度感知

# 应用前景



# 应用前景





# 华南理工大学

South China University of Technology

1 研究背景

2 基本架构

3 应用前景

4 系统模型

5 关键挑战

6 研究进展

7 原型验证

8 总结展望

# 可转向天线模型

## ➤ 天线指向向量

可转向天线的**视轴朝向**可以描述为：

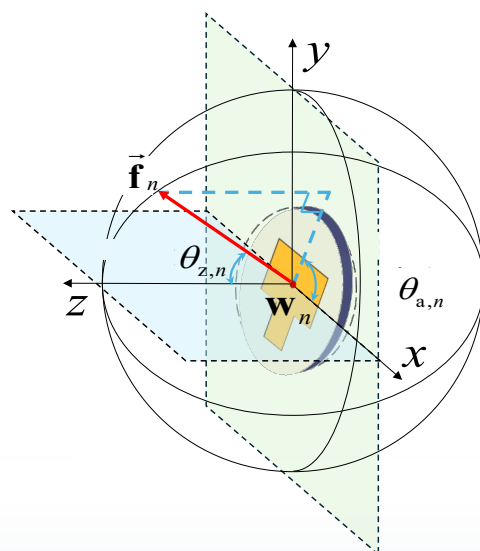
$$\vec{\mathbf{f}}_n = [f_{x,n}, f_{y,n}, f_{z,n}]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$$

- 其中  $f_{x,n} = \sin \theta_{z,n} \cos \theta_{a,n}$   
 $f_{y,n} = \sin \theta_{z,n} \sin \theta_{a,n}$   
 $f_{z,n} = \cos \theta_{z,n}$

- $\theta_{z,n}$  和  $\theta_{a,n}$  分别表示相对于z轴的**天顶角**和**方位角**

- 单位模量约束：

$$\|\vec{\mathbf{f}}_n\| = 1, \forall n$$

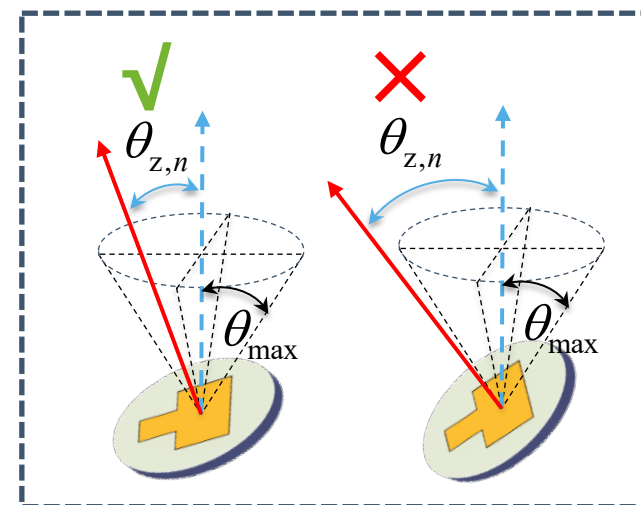


## ➤ 转动范围约束

- 机械/电子调控方式的**转动范围受限**
- 避免方向图重叠**而引起电磁干扰

$$0 \leq \theta_{z,n} \leq \theta_{\max}, \forall n \quad \longleftrightarrow \quad \theta_{z,n} = \arccos(\vec{\mathbf{f}}_n \mathbf{e}_3) = f_{z,n}$$

$\theta_{\max} \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$  为所允许的**最大转动角**

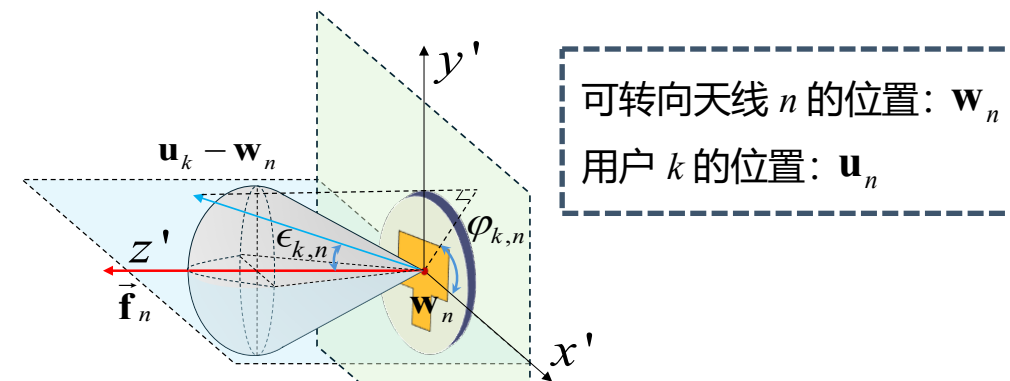


# 天线方向增益模型

## ➤ 天线方向增益图

$$G_e(\epsilon, \varphi) = \begin{cases} G_0 \cos^{2p}(\epsilon), & \epsilon \in [0, \frac{\pi}{2}), \varphi \in [0, 2\pi) \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

- $\epsilon, \varphi$  : 信号入射角/离开角 (相对于天线视轴朝向)
- $G_0 = 2(2p+1)$  : 视轴朝向的**最大方向增益** (功率守恒)
- **方向性因子**  $p$  越大, 主瓣越窄,  $G_0$  越大

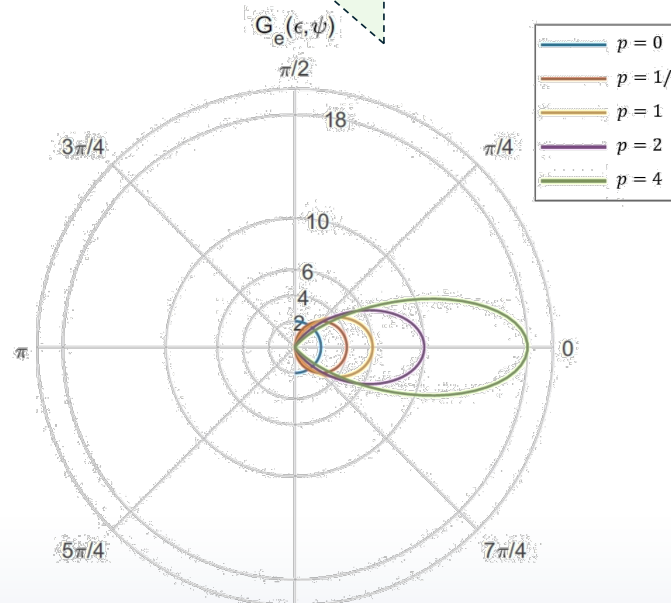


## ➤ 信道功率增益

$$g_k(\vec{f}_n) \approx \underbrace{\frac{A}{4\pi r_{k,n}^2}}_{\text{路径增益}} \underbrace{G_0 \cos^{2p}(\epsilon_{k,n})}_{\text{方向增益}} = \frac{AG_0}{4\pi r_{k,n}^2} \left( \vec{f}_n^T \vec{u}_{k,n} \right)^{2p}$$

- $A$  : 天线辐射孔径     $r_{k,n}$  : 传播距离     $\vec{u}_{k,n} = \frac{\mathbf{u}_k - \mathbf{w}_n}{\|\mathbf{u}_k - \mathbf{w}_n\|}$  : **用户方向向量**

天线视轴朝向的转动 ( $\vec{f}_n$  的变化) 将**改变信道的方向增益**



# 传播信道模型

## ➤ 几何近场信道

- 可转向天线  $n$  和用户  $k$  之间的多径信道由视距成分和非视距成分构成：

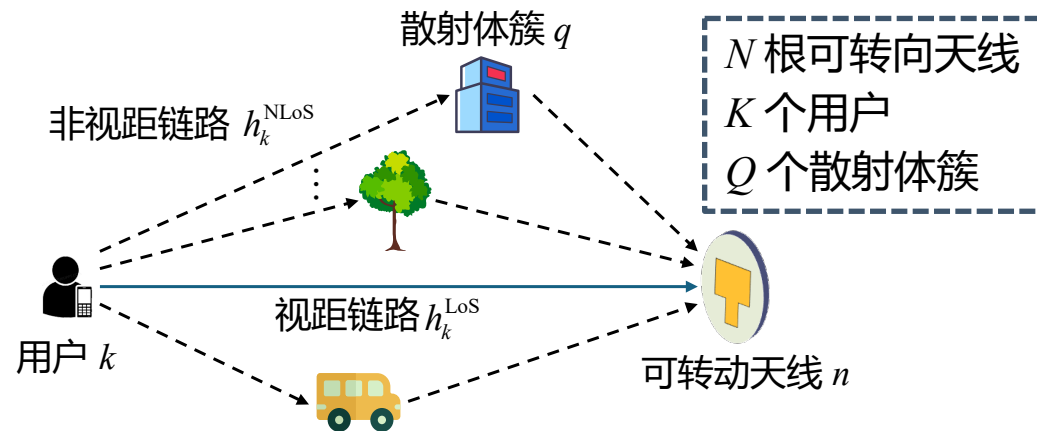
$$h_k^{\text{LoS}}(\vec{\mathbf{f}}_n) = \sqrt{g_{u,k}(\vec{\mathbf{f}}_n)} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_{k,n}}$$

$$h_k^{\text{NLoS}}(\vec{\mathbf{f}}_n) = \sum_{q=1}^Q \frac{\sqrt{\sigma_q g_{c,q}(\vec{\mathbf{f}}_n)}}{t_{k,q}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (d_{q,n} + t_{k,q}) + j\chi_q}$$

- 基站和用户  $k$  之间的多径信道矢量：

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{F}) = \mathbf{h}_k^{\text{LoS}}(\mathbf{F}) + \mathbf{h}_k^{\text{NLoS}}(\mathbf{F})$$

- 其中  $\mathbf{h}_k^{\text{LoS}}(\mathbf{F}) \triangleq [h_k^{\text{LoS}}(\vec{\mathbf{f}}_1), h_k^{\text{LoS}}(\vec{\mathbf{f}}_2), \dots, h_k^{\text{LoS}}(\vec{\mathbf{f}}_N)]^T$   
 $\mathbf{h}_k^{\text{NLoS}}(\mathbf{F}) \triangleq [h_k^{\text{NLoS}}(\vec{\mathbf{f}}_1), h_k^{\text{NLoS}}(\vec{\mathbf{f}}_2), \dots, h_k^{\text{NLoS}}(\vec{\mathbf{f}}_N)]^T$
- $\mathbf{F} \triangleq \{\vec{\mathbf{f}}_1, \vec{\mathbf{f}}_2, \dots, \vec{\mathbf{f}}_N\} \in \mathbb{R}^{3 \times N}$  为所有天线的指向矩阵



## ➤ 远场近似

- 基站和用户之间信息传输近似为平面波
- 用户相对于每根天线的方向近似相同

$$\cos(\epsilon_{k,1}) \approx \dots \approx \cos(\epsilon_{k,N}) \rightarrow \mathbf{h}_k(\mathbf{F}) = \left( \text{diag}(\mathbf{g}_k(\mathbf{F})) \right)^{\frac{1}{2}} \mathbf{a}(\Phi_k, \Psi_k)$$

$$\text{导向矢量: } \mathbf{a}(\Phi_k, \Psi_k) = \left[ 1, e^{-j\frac{2\pi\Delta}{\lambda}\Phi_k}, \dots, e^{-j\frac{2\pi\Delta}{\lambda}(N_x-1)\Phi_k} \right]^T \otimes \left[ 1, e^{-j\frac{2\pi\Delta}{\lambda}\Psi_k}, \dots, e^{-j\frac{2\pi\Delta}{\lambda}(N_y-1)\Psi_k} \right]^T$$

$$\text{方向增益矢量: } \mathbf{g}_k(\mathbf{F}) \approx G_0 \left[ \left( \vec{\mathbf{f}}_1^T \vec{\mathbf{u}}_k \right)^{2p}, \left( \vec{\mathbf{f}}_2^T \vec{\mathbf{u}}_k \right)^{2p}, \dots, \left( \vec{\mathbf{f}}_N^T \vec{\mathbf{u}}_k \right)^{2p} \right]^T$$

# 系统优化框架

## ➤ 可转向天线系统的优化设计

$$\max_{\mathbf{F}, \mathcal{S}} U(\mathbf{F}, \mathcal{S})$$

$$\text{s.t. } f_i(\mathbf{F}, \mathcal{S}) \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, I_1,$$

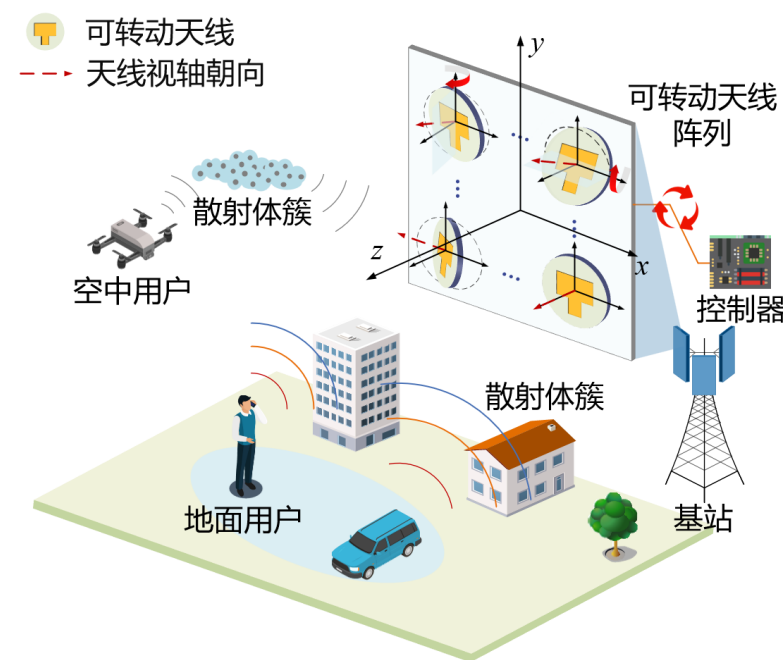
$$g_i(\mathcal{S}) \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, I_2,$$

$$0 \leq \arccos(\vec{\mathbf{f}}_n^T \mathbf{e}_3) \leq \theta_{\max}, \forall n = 1, 2, \dots, N, \quad \text{天线转动范围约束}$$

$$\|\vec{\mathbf{f}}_n\| = 1, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad \text{指向向量单位模量约束}$$

$\mathbf{F}$ : 所有可转向天线的指向向量

$\mathcal{S}$ : 可用的系统资源



- $U$ : 效用函数 (例如: 通信速率、系统能效、覆盖范围、感知精度等性能指标)
- $f_i$ : 耦合约束 (共同涉及天线指向向量和系统资源配置, 例如: 最小通信速率、最大感知误差等)
- $g_i$ : 系统资源约束 (例如: 发射功率、带宽、传输时间、波束赋形等)



# 华南理工大学

South China University of Technology

**1** 研究背景

**2** 基本架构

**3** 应用前景

**4** 系统模型

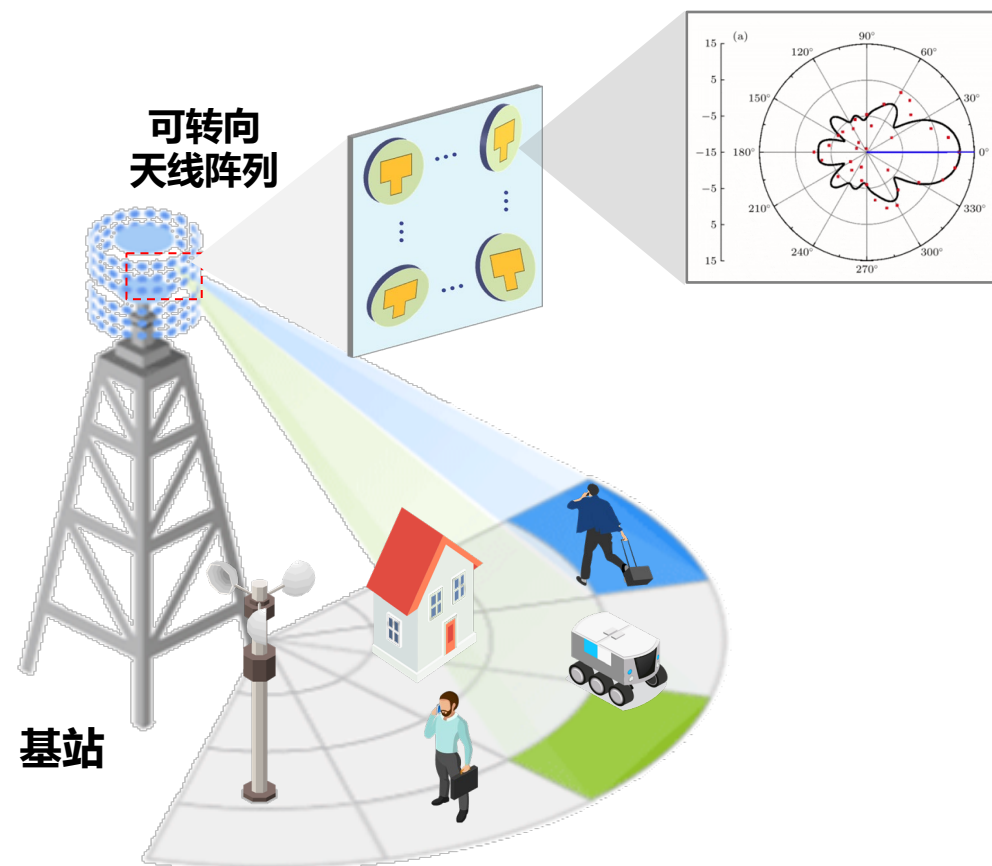
**5** 关键挑战

**6** 研究进展

**7** 原型验证

**8** 总结展望

# 转动扫描调度



可转向天线系统通过**改变视轴朝向**进行转动扫描调度，从而**扩大通感范围**、实现**实时跟踪识别**等

## 转动扫描设计挑战



### 多参数联合设计问题

转动扫描参数（分辨率、范围、频率、模式等）互相耦合，导致了**优化空间的高维性**



### 实际部署/硬件实现约束

实际系统中，转动扫描调度受限于**转动响应速度**、**电机精度**或电子控制**状态组合**的限制



### 信号处理任务协同问题

转动方向影响波束指向、干扰管理等，需要与波束赋形、功率控制等任务**联合优化**

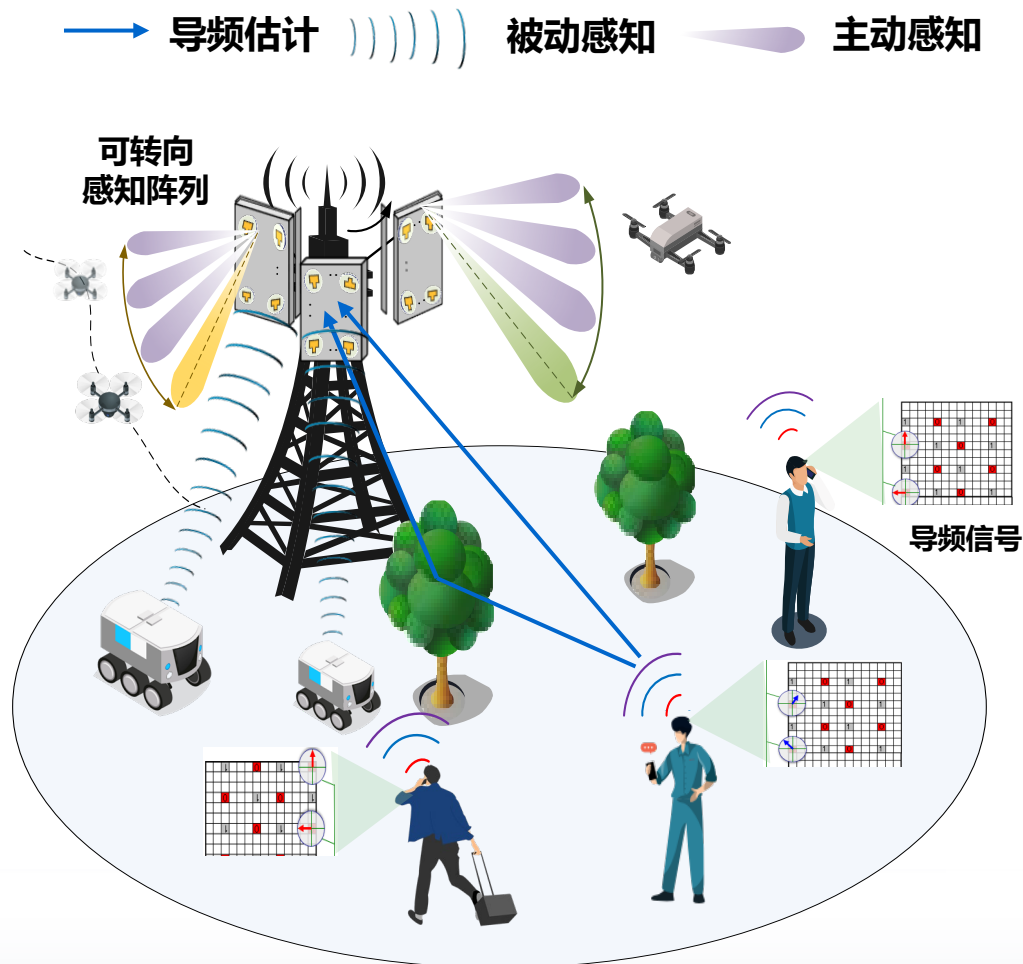


### 性能成本平衡

扫描任务在提升性能的同时，不可避免带来硬件控制和功耗成本，需要**任务感知型调度策略**以实现平衡

# 环境感知估计

## 高精度/广范围感知估计



### 可移动天线 (MA)

- 信号传播环境随天线的移动发生变化
- 需要重构移动区域完整的信道信息 (无穷数量信道响应)

### 可转向天线 (RA)

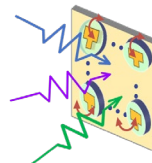
- 只改变天线视轴朝向, 不改变信号传播环境
- 仅需估计少量环境参数 (如目标、散射体信息)



## 感知估计设计挑战

### 多视角感知估计

通过分时扫描多个视角以提升空间感知自由度, 引入**额外的时域开销与信号处理需求**



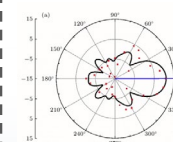
### 多维信息融合

不同角度下获得的观测数据统计特性不同, 需要**复杂的信号融合方法**进行联合估计

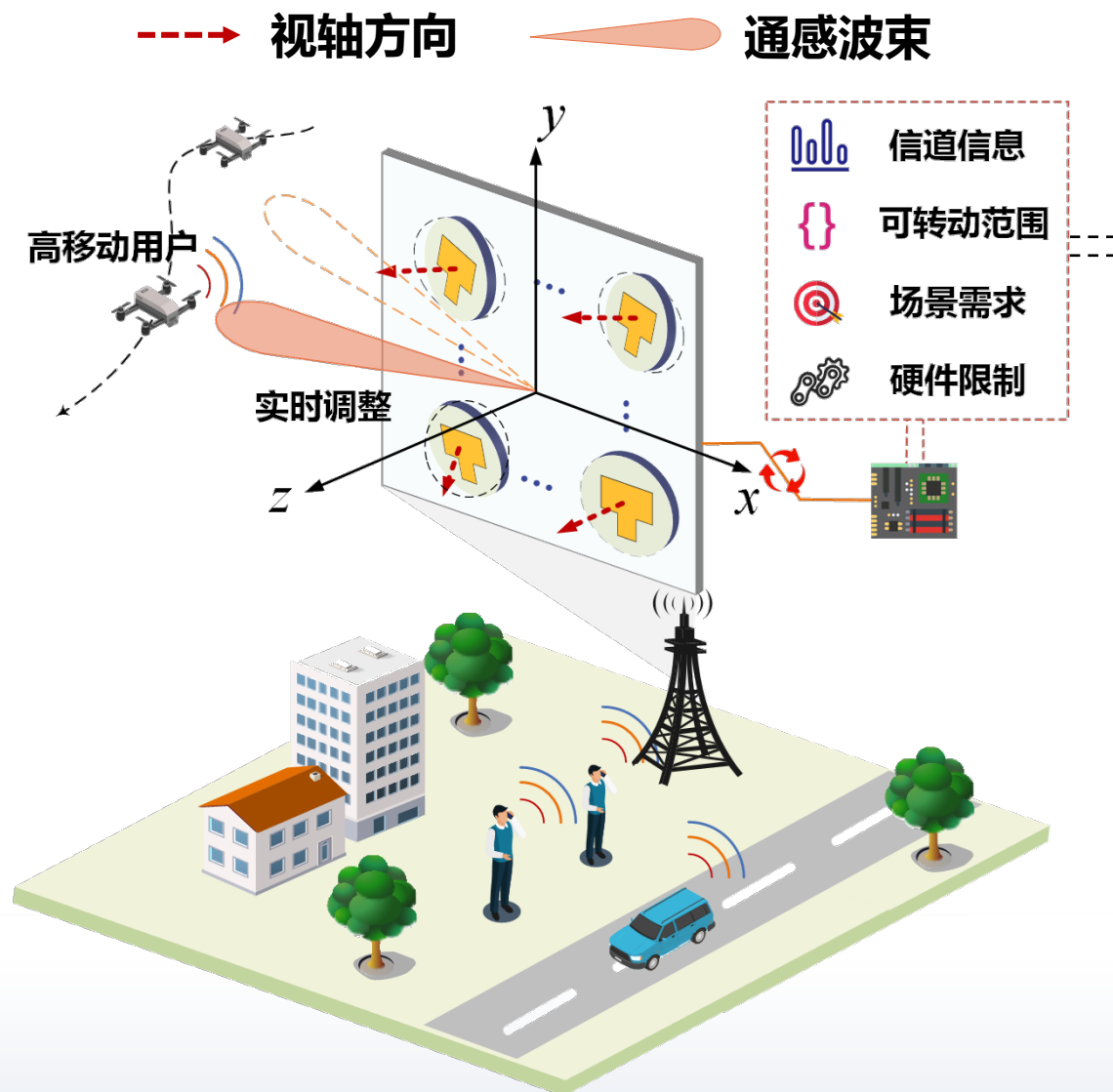


### 扫描调度联合设计

感知控制联合优化问题计算复杂且决策维度高, 需要进行**性能和成本的平衡**



# 视轴朝向优化



## 视轴朝向优化挑战

### 依赖于信道状态信息的获取

视轴朝向的优化高度依赖于信道状态信息，使得**信道精准获取**和**系统鲁棒性设计**至关重要

### 视轴朝向的离散优化

考虑步进电机转动、馈电状态选择等实际限制，视轴朝向的离散优化导致了**非凸整数规划问题**

### 高动态场景下实时调控问题

高动态场景下，为了适应用户的动态空间分布和信道的快速时变，视轴朝向需**及时动态调整**

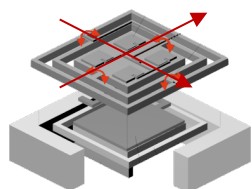
### 波束赋形联合设计问题

波束赋形与视轴朝向**紧密耦合**，**非凸约束条件**使得优化问题难以直接求解

# 系统架构设计

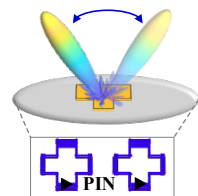
## 不同的可转向天线系统架构对系统的整体性能与开销有不同影响

### 机械调节



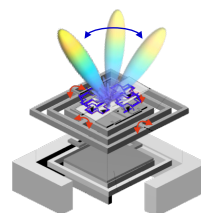
可转向范围大  
转动响应延迟

### 电子调节



响应速度快  
控制精度有限

### 双型调节



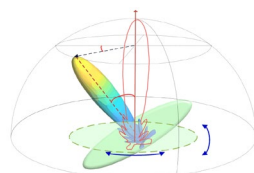
转动控制灵活  
机电协同复杂

### 阵列旋转



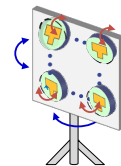
灵活性有限  
转动控制简单

### 天线旋转



精度高、灵活性强、  
同步校准复杂

### 复合旋转

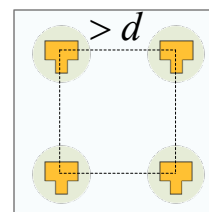


转动灵活、设计  
复杂度高

## 系统架构设计挑战

### 天线布局设计

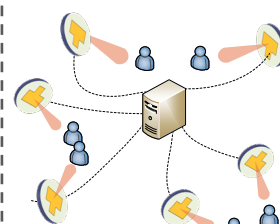
天线间距、转动机制设计与结构之间相互影响，设计需考虑通感性能、空间复用率与硬件实现复杂度的权衡



**稀疏可转向天线阵列**：抑制相邻天线间的转动耦合，提高空间感知分辨率，存在栅瓣导致通信系统中的用户间干扰

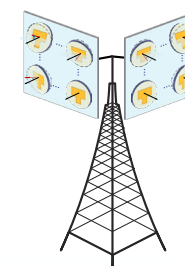
### 天线部署策略

不同部署策略直接影响系统的控制灵活性、通感性能与覆盖范围，需根据实际场景设计



分布式部署

协作波束赋形扩展覆盖范围、增强空间分集增益，



高增益窄波束，易受物理遮挡限制

集中式部署



# 华南理工大学

South China University of Technology

1 研究背景

2 基本架构

3 应用前景

4 系统模型

5 关键挑战

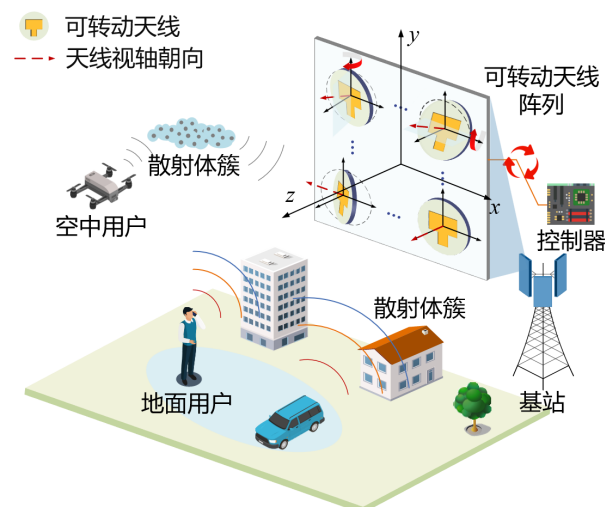
6 研究进展

7 原型验证

8 总结展望

# 上行MIMO通信系统

## 可转向天线辅助上行通信系统



联合优化波束赋形和所有可转向天线的指向向量，最大化所有用户中的最小信干噪比

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{V}, \mathbf{F}} \quad & \min_k \gamma_k = \frac{\bar{P}_k |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k(\mathbf{F})|^2}{\sum_{j \neq k} \bar{P}_j |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_j(\mathbf{F})|^2 + 1} \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq \arccos(\vec{\mathbf{f}}_n^T \mathbf{e}_3) \leq \theta_{\max}, \forall n, \\ & \|\vec{\mathbf{f}}_n\| = 1, \forall n, \\ & \|\mathbf{v}_k\| = 1, \forall k \end{aligned}$$

### 单用户场景 (自由空间传播)

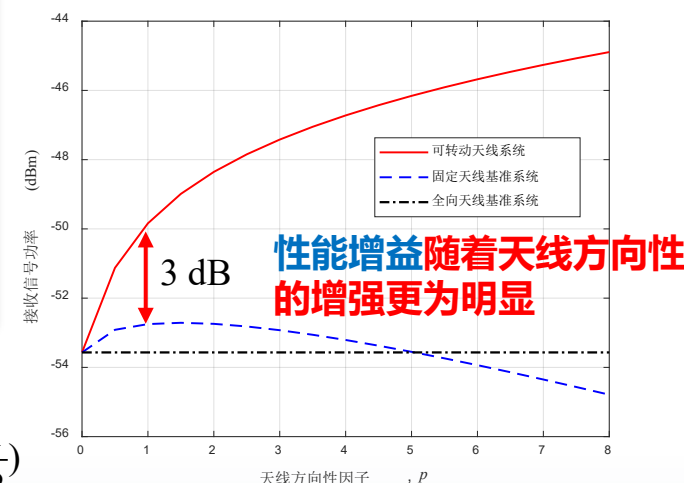
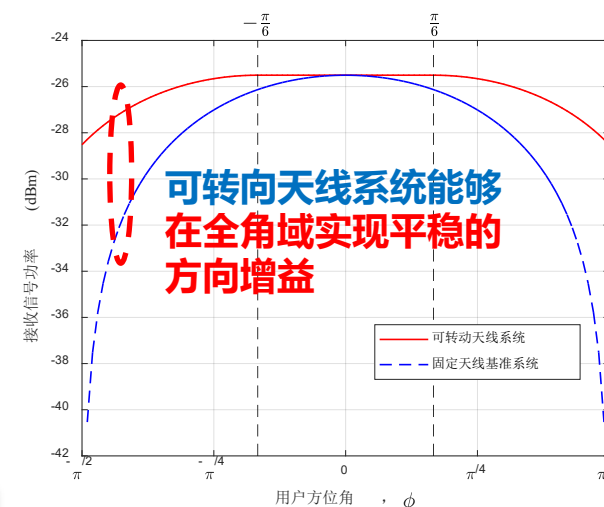
基于最大比合并的波束赋形，信干噪比最大化问题简化为投影最大化问题

$$\begin{aligned} \max_{\vec{\mathbf{f}}_n} \quad & \cos(\epsilon_n) = \vec{\mathbf{f}}_n^T \vec{\mathbf{u}}_n \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq \arccos(\vec{\mathbf{f}}_n^T \mathbf{e}_3) \leq \theta_{\max}, \\ & \|\vec{\mathbf{f}}_n\| = 1 \end{aligned}$$

最优指向向量的闭式解(所有可转向天线的视轴朝向尽可能对准用户的方向):

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{f}}_n^* &= [\sin \theta_{z,n}^* \cos \theta_{a,n}^*, \sin \theta_{z,n}^* \sin \theta_{a,n}^*, \cos \theta_{z,n}^*]^T \\ \text{其中 } \theta_{z,n}^* &= \min \left\{ \arccos(\vec{\mathbf{u}}_n^T \mathbf{e}_3), \theta_{\max} \right\} \\ \theta_{a,n}^* &= \arctan 2 \left( \vec{\mathbf{u}}_n^T \mathbf{e}_2, \vec{\mathbf{u}}_n^T \mathbf{e}_1 \right) \end{aligned}$$

渐进增益:  $\lim_{N_x \rightarrow \infty} \frac{\gamma}{\gamma_{\text{fixed}}} = \theta_{\max} + \cos \theta_{\max} \geq 1 \quad (p = \frac{1}{2})$



# 上行MIMO通信系统

## ➤ 多用户场景 (多径信道)

### □ 交替优化算法

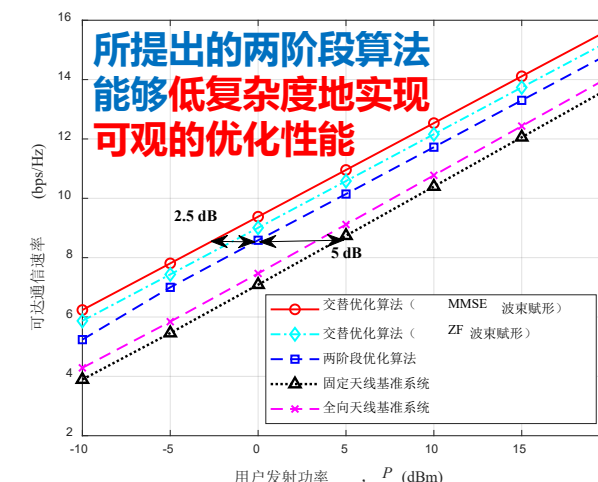
- 以**迭代**的方式**交替优化**波束赋形和可转向天线的指向向量直至收敛
- 考虑最优的**MMSE波束赋形**
- 采用**连续凸近似方法**求解指向向量优化问题

### □ 两阶段优化算法

- 天线方向性因子  $p$  的变化不会改变不同方向之间辐射功率的相对大小
- 假设  $p = 1$  并且考虑ZF波束赋形, 指向向量优化问题可以近似为一个**信道功率增益最大化问题**
- 只需求解一次半正定规划问题和计算一次ZF波束赋形**

### 指向向量优化问题

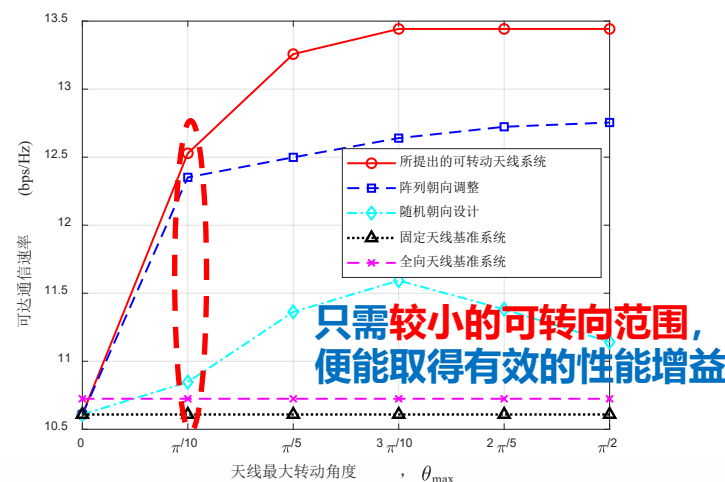
$$\begin{aligned} \max_{\eta, \mathbf{F}} \quad & \eta \\ \text{s.t.} \quad & \frac{\bar{P}_k |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k(\mathbf{F})|^2}{\sum_{j \neq k} \bar{P}_j |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_j(\mathbf{F})|^2 + 1} \geq \eta, \forall k, \rightarrow \text{凸近似处理} \\ & \cos(\theta_{\max}) \leq \bar{\mathbf{f}}_n^T \mathbf{e}_3 \leq 1, \forall n, \\ & \|\bar{\mathbf{f}}_n\| = 1, \forall k \rightarrow \text{等式约束松弛 } \|\bar{\mathbf{f}}_n\| \leq 1, \forall k \end{aligned}$$



### 信道功率增益最大化问题(半正定规划)

$$\begin{aligned} \max_{\omega, \mathbf{F}} \quad & \omega \\ \text{s.t.} \quad & \rho_k \bar{P}_k \text{Tr}(\mathbf{M}_k \bar{\mathbf{F}}) \geq \omega, \forall k, \\ & \bar{\mathbf{F}}_{3(n-1)+1, 3(n-1)+1} \geq \cos^2 \theta_{\max}, \forall n, \\ & \text{Tr}(\bar{\mathbf{F}}_{3(n-1)+1, 3(n-1)+1, 3(n-1)+1, 3(n-1)+1}) = 1, \forall n, \\ & \bar{\mathbf{F}} \succeq \mathbf{0}. \end{aligned}$$

$$\text{其中 } \bar{\mathbf{F}} = \mathbf{f} \mathbf{f}^T \text{ 且 } \mathbf{f} \triangleq [\bar{\mathbf{f}}_1^T, \bar{\mathbf{f}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{f}}_N^T]^T \in \mathbb{R}^{3N \times 1}$$



# 两阶段渐进式信道估计

## 可转向天线辅助上行通信系统

### 信道模型 (用户 $k$ 与基站)

辐射方向图系数 阵列导向矢量

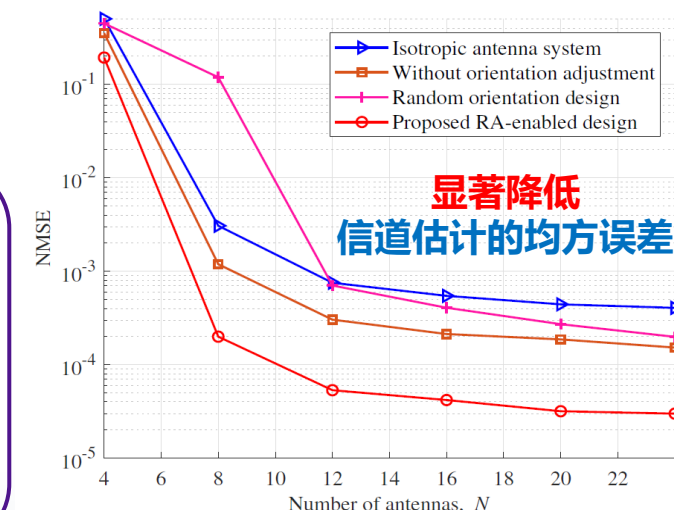
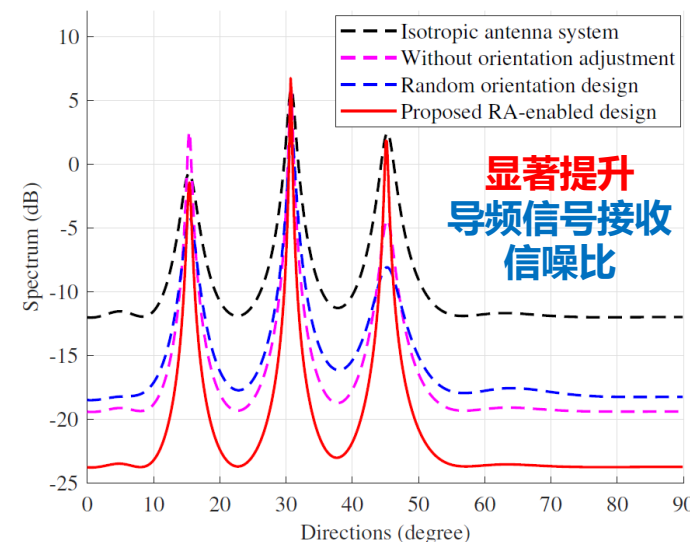
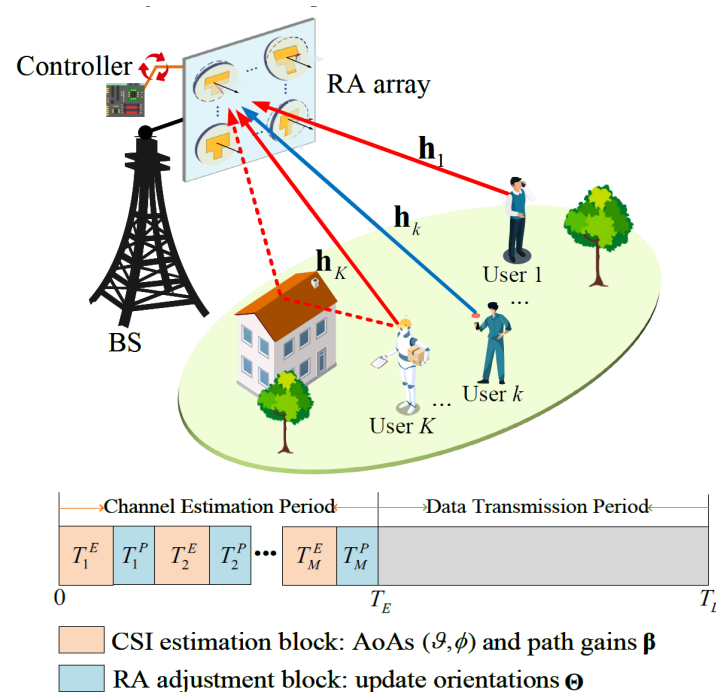
$$\mathbf{h}_k(\Theta) = \beta_k \mathbf{g}_k(\Theta) \odot \mathbf{a}_k(\vartheta_k, \phi_k)$$

姿态角矩阵:  $\Theta = [\theta_1, \dots, \theta_N] \in \mathbb{R}^{2 \times N}$

路径增益系数:  $\beta_k$  路径方向角:  $\vartheta_k, \phi_k$

## 估计方案: 两进程交替进行

- 利用可转向天线的空间感知自由度提高估计精度
- 基于估计的CSI, 调整可转向天线的姿态角来最大化有效路径增益, 依次交替地估计CSI和更新姿态角



### 进程1: CSI估计

- 方向角估计: 多重信号分类算法

$$V(\vartheta, \phi; \Theta) = \frac{1}{\mathbf{b}^H(\vartheta, \phi; \Theta) \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{b}(\vartheta, \phi; \Theta)}$$

- 路径增益估计: 最小二乘法

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H \tilde{\mathbf{y}}$$

### 进程2: 可转向天线姿态角设计

- 优化可转向天线姿态角以最大化有效信道增益

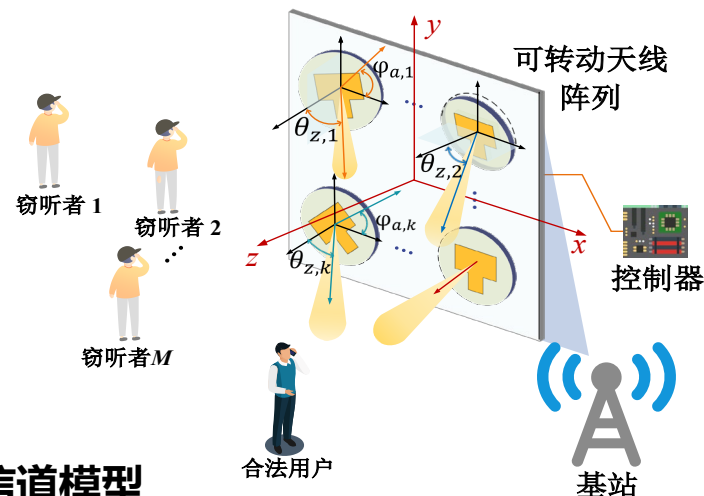
$$\max_{\Theta} \quad \gamma = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{h}_k(\Theta)\|^2$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq \theta_n^z \leq \theta_{\max}, \forall n.$$

- 利用梯度上升算法求解天线的姿态角矩阵

# 物理层安全

## 可转向天线辅助安全通信系统



➤ 目标问题：最大化安全速率

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{v}, \Theta} \quad & [R_u - R_e]^+ \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq \theta_{z,k} \leq \theta_{\max}, \forall k, \\ & \|\mathbf{v}\|^2 \leq P_{\text{AP}}, \end{aligned}$$

### 解决思路

• 波束赋形设计

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{v}} \quad & \log_2 \left( \frac{1 + \mathbf{v}^H \mathbf{A} \mathbf{v}}{1 + \mathbf{v}^H \mathbf{B} \mathbf{v}} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \|\mathbf{v}\|^2 \leq P_{\text{AP}}. \end{aligned}$$

利用广义瑞利熵得到最优解

• 可转向天线姿态角设计

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{F}} \quad & \Lambda_r^{(i+1)}(\mathbf{F}) - \Omega_M^{(i+1)}(\mathbf{F}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{f}_k^T \mathbf{e}_3 \geq \cos(\theta_{\max}), \forall k, \\ & \|\mathbf{f}_k\| \leq 1, \forall k. \end{aligned}$$

利用SCA近似求解线性方程

➤ 信道模型

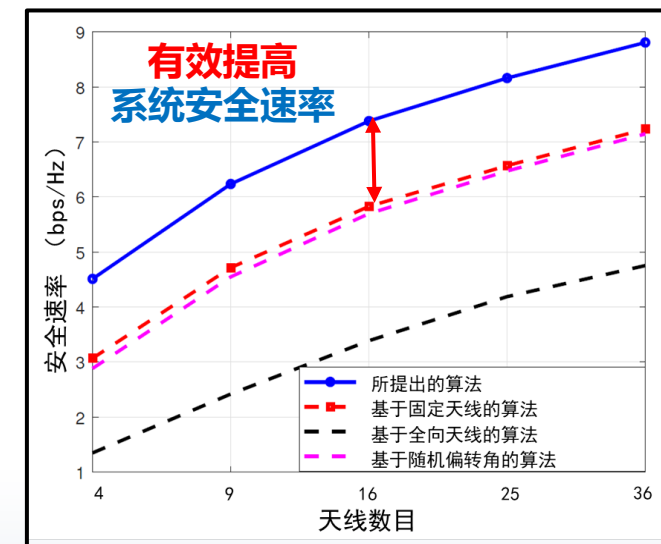
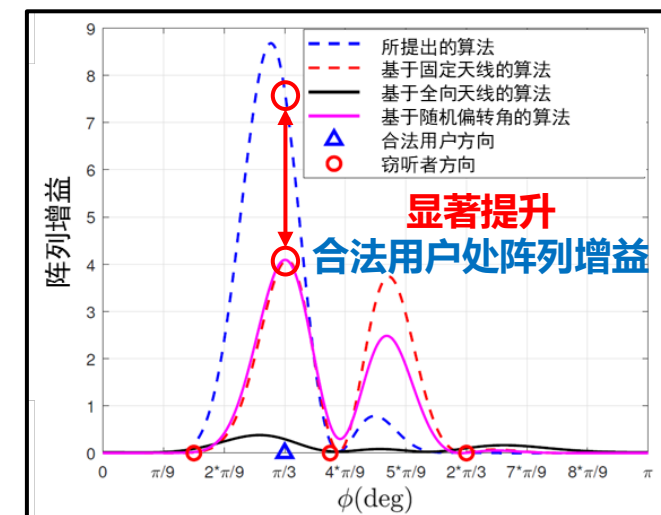
$$h_{m,k}(\theta_k) = \sqrt{L(d_{m,k})} \boxed{G_{m,k}} g_{m,k} \quad \text{天线波束增益}$$

大尺度信道功率增益:  $L(d_{m,k})$  小尺度信道衰落因子:  $g_{m,k}$

信道矩阵:  $\mathbf{h}_m(\Theta) = [h_{m,1}(\theta_1), h_{m,2}(\theta_2), \dots, h_{m,K}(\theta_K)]^T$

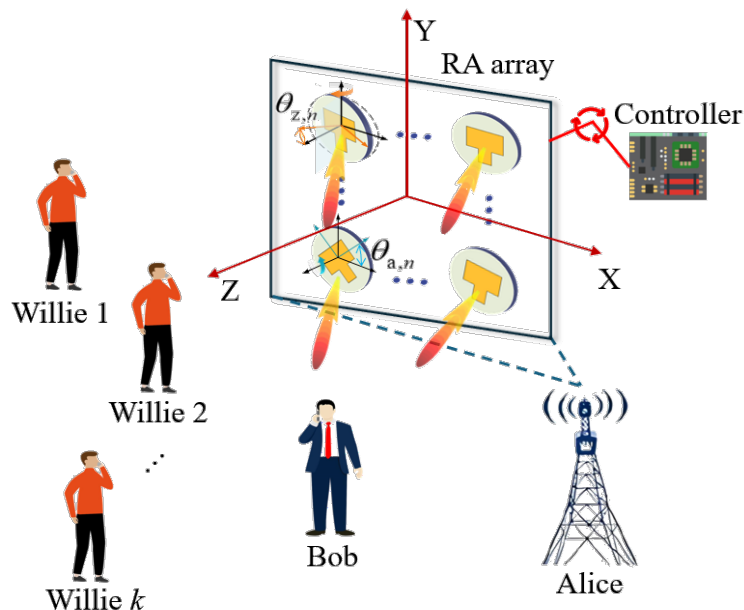
➤ 合法用户/窃听者可达速率

$$\begin{aligned} R_u &= \log_2 \left( 1 + \frac{|\mathbf{v}^H \mathbf{h}_0(\Theta)|^2}{\sigma_0^2} \right) \\ R_e &= \log_2 \left( 1 + \frac{\sum_{m=1}^M |\mathbf{v}^H \mathbf{h}_m(\Theta)|^2}{\sigma_m^2} \right) \end{aligned}$$



# 隐蔽通信

## 可转向天线辅助隐蔽通信



### ➤ Bob接收信噪比

$$\gamma_b = \frac{|\mathbf{w}^H \mathbf{h}_{ab}(\Theta)|}{\sigma_b^2}$$

### ➤ 每个Willie的最小错误检测概率

$$\xi_k^* = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2\ln \rho} \ln \left( 1 + \frac{\rho v}{\tilde{\sigma}_w^2} \right), & v \leq \rho \tilde{\sigma}_w^2 - \frac{1}{\rho} \tilde{\sigma}_w^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

推导隐蔽约束条件

## 问题建立与求解

### 问题建立-最大化隐蔽速率

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}, \Theta} \quad & \log_2 \left( 1 + \frac{|\mathbf{w}^H \mathbf{h}_{ab}(\Theta)|^2}{\sigma_b^2} \right) \\ \text{s.t.} \quad & |\mathbf{w}^H \mathbf{h}_{aw,k}(\Theta)|^2 \leq \eta, \quad \text{隐蔽性约束} \\ & \|\mathbf{w}\|^2 \leq P_{\max}, \quad \text{功率约束} \\ & 0 \leq \theta_{z,n} \leq \theta_{\max}, \quad \text{天线转动角度约束} \\ & 0 \leq \theta_{a,n} \leq 2\pi, \end{aligned}$$

### 问题求解-交替优化算法

#### ➤ 子问题一：固定偏转角

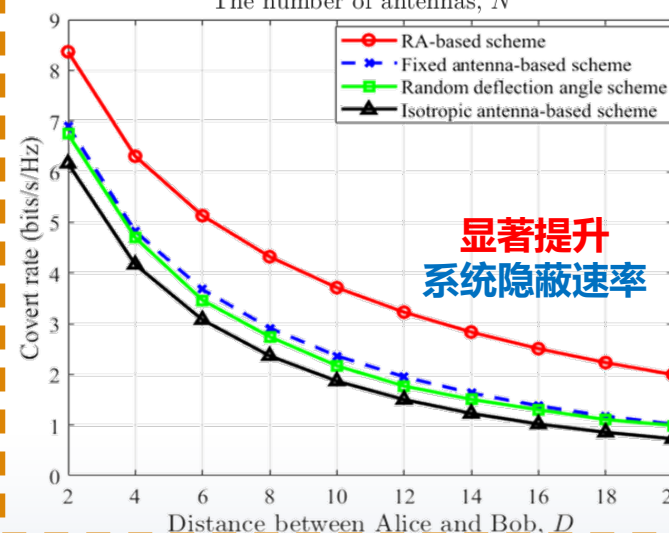
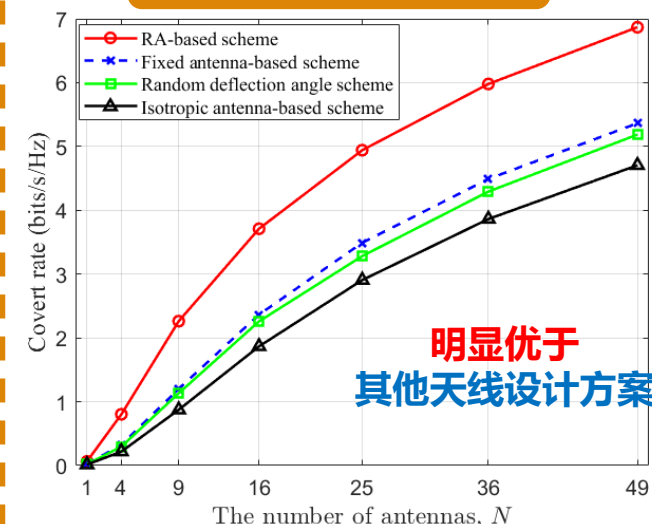
$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}} \quad & |\mathbf{w}^H \mathbf{h}_{ab}(\Theta)|^2 \\ \text{s.t.} \quad & |\mathbf{w}^H \mathbf{h}_{aw,k}(\Theta)|^2 \leq \eta, \quad \forall k, \\ & \|\mathbf{w}\|^2 \leq P_{\max}. \end{aligned}$$

#### ➤ 子问题二：固定波束成形矢量

$$\begin{aligned} \max_{\Theta} \quad & |\mathbf{w}^H \mathbf{h}_{ab}(\Theta)|^2 \\ \text{s.t.} \quad & |\mathbf{w}^H \mathbf{h}_{aw,k}(\Theta)|^2 \leq \eta, \quad \forall k, \\ & 0 \leq \theta_{z,n} \leq \theta_{\max}, \quad 0 \leq \theta_{a,n} < 2\pi, \quad \forall n. \end{aligned}$$

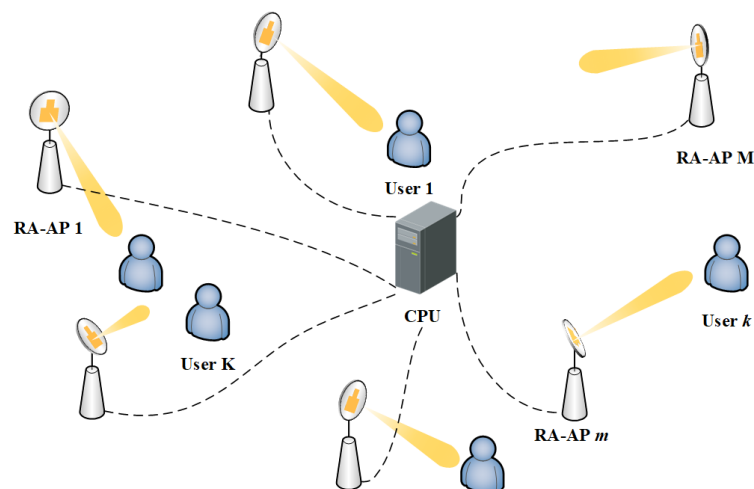
利用SCA近似，转化为二次凸问题求解

## 仿真结果

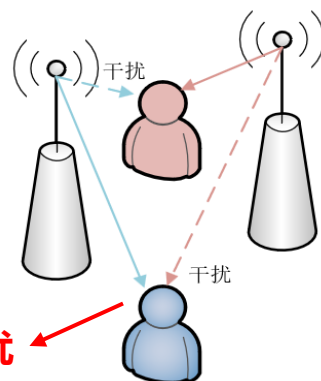


# 无蜂窝通信 (cell-free)

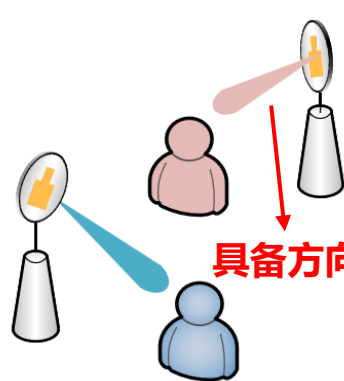
## 可转向天线辅助cell-free系统



### 全向天线



### 可转向天线



## 问题建立

- 目标: 改善用户公平性

$$\max_{\mathbf{e}, \mathbf{B}} \min_k \gamma_k$$

$$\text{s.t. } \|\vec{e}_l\| = 1, \forall l, \quad \text{单位指向向量约束}$$

$$\|b_k\| \geq 1, \forall k, \quad \text{AP选择约束 (保证用户均获得服务)}$$

RA指向向量:  $\vec{e}_l$  AP选择指示符号:  $b_{l,k}$

## 问题解决

- AP选择策略

|      | AP 1 | AP I      | AP L |
|------|------|-----------|------|
| 用户 1 | 1    | ...       | 1    |
| 用户 k | ...  | $b_{l,k}$ | ...  |
| 用户 K | 1    | ...       | 0    |

以信道增益为评价指标, 考虑可转向天线覆盖约束, 决定AP选择矩阵

- 可转向天线指向向量优化

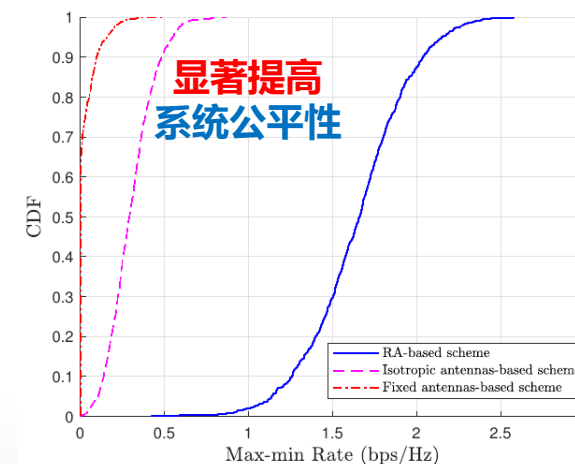
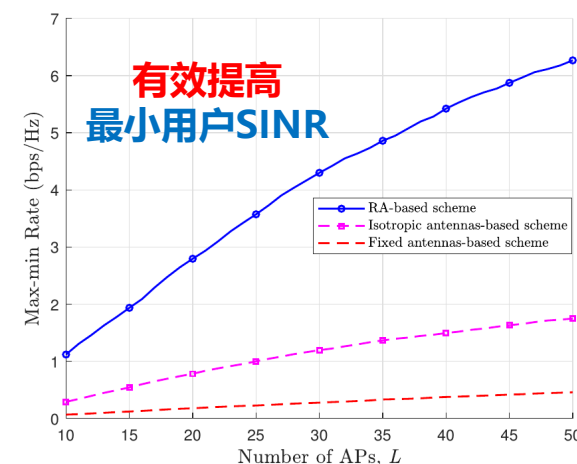
$$\max_{\mathbf{e}, \eta} \eta$$

$$\text{s.t. } \gamma_k \geq \eta$$

$$\|\vec{e}_l\| = 1, \forall l$$

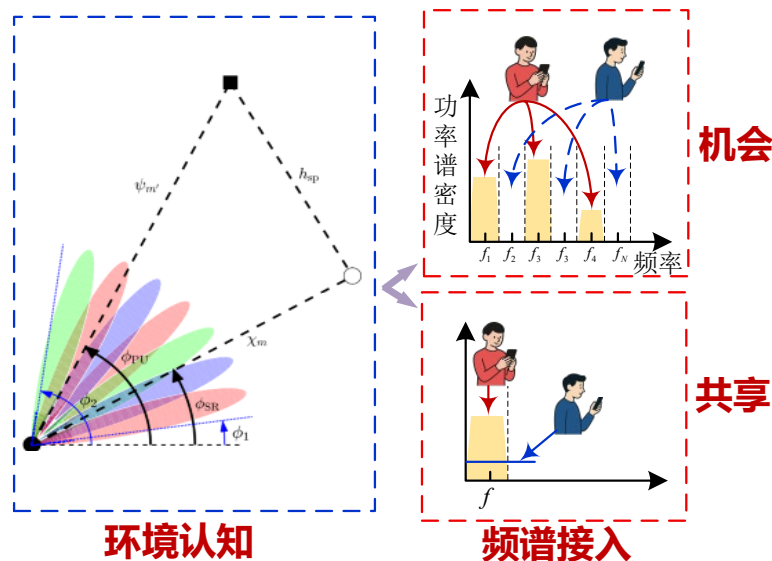
利用分式规划+SCA近似得到最优解

## 仿真结果

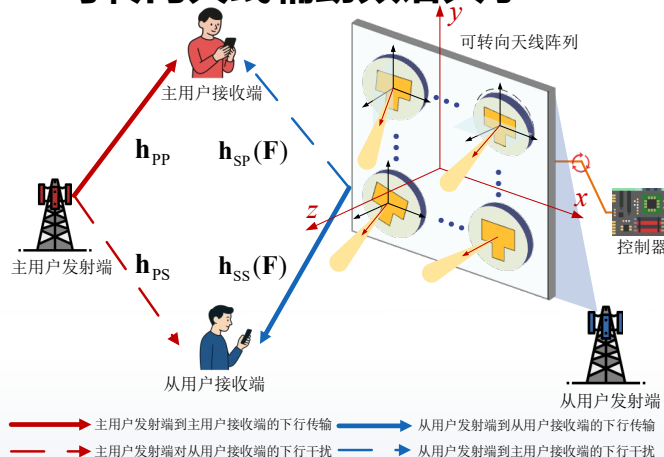


# 认知无线电

## 可转向天线辅助认知无线电



## 可转向天线辅助频谱共享



## 问题建立与求解

问题：最大化从用户接收端信干噪比

$$\max_{\mathbf{w}, \Theta} \frac{|\mathbf{w}^H \mathbf{h}^{SS}(\Theta)|^2}{|\mathbf{v}^H \mathbf{h}^{PS}|^2 + \sigma^2}$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \theta_{z,n} \leq \theta_{\max}, \forall n,$$

$$\|\mathbf{w}\|^2 \leq P_{\max},$$

从用户发射端  
功率约束

$$|\mathbf{w}^H \mathbf{h}^{SP}(\Theta)|^2 \leq \Gamma.$$

干扰约束

交替优化算法求解：

• 固定天线的偏转角

$$\max_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{H}^{SS}(\Theta) \mathbf{w}$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{w}\|^2 \leq P_{\max},$$

$$\mathbf{w}^H \mathbf{H}^{SP}(\Theta) \mathbf{w} \leq \Gamma.$$

• 固定波束赋形矩阵

$$\max_{\mathbf{F}} |\mathbf{w}^H \mathbf{h}^{SS}(\mathbf{F})|^2$$

$$\text{s.t. } \mathbf{f}_n^T \mathbf{e}_3 \geq \cos(\theta_{\max}), \forall n,$$

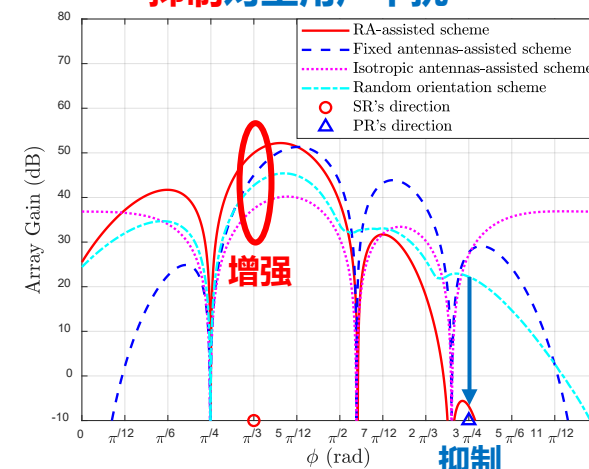
$$|\mathbf{w}^H \mathbf{h}^{SP}(\mathbf{F})|^2 \leq \Gamma.$$

$$\|\mathbf{f}_n\| \leq 1, \forall n.$$

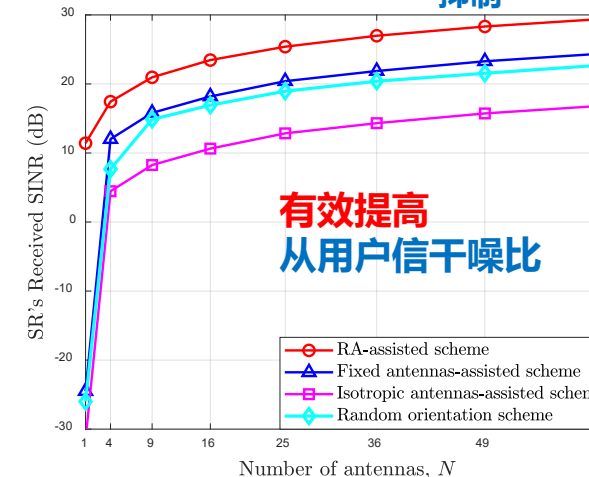
利用SCA近似和构造二次上界求解方程

## 仿真结果

增强从用户信号强度，  
抑制对主用户干扰



有效提高  
从用户信干噪比





# 华南理工大学

South China University of Technology

1 研究背景

2 基本架构

3 应用前景

4 系统模型

5 关键挑战

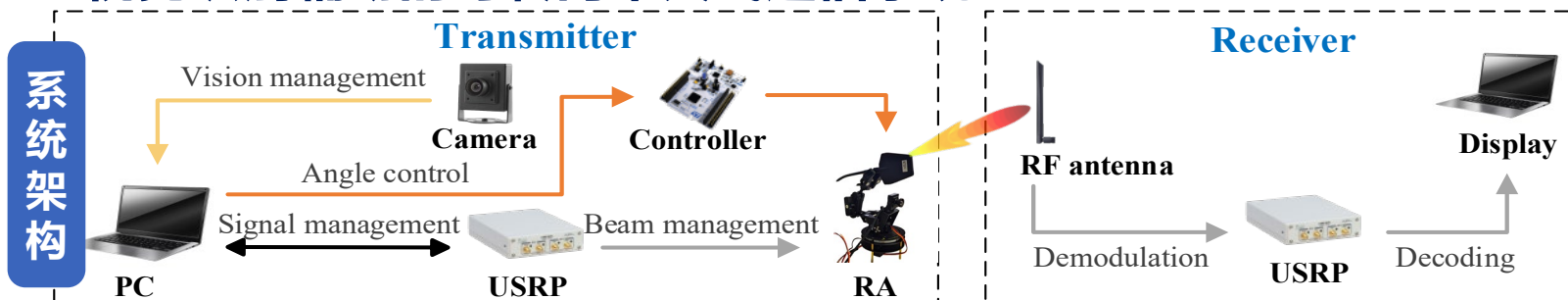
6 研究进展

7 原型验证

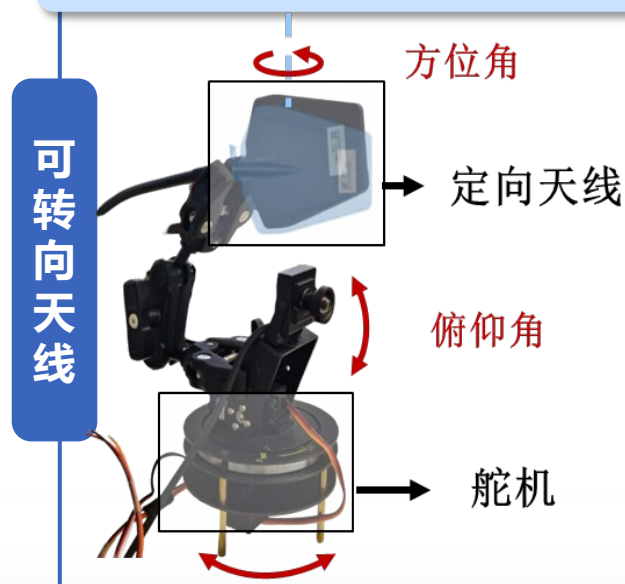
8 总结展望

# 可转向天线单天线原型

## 视觉识别辅助的可转向单天线通信系统



### 舵机 + 定向天线



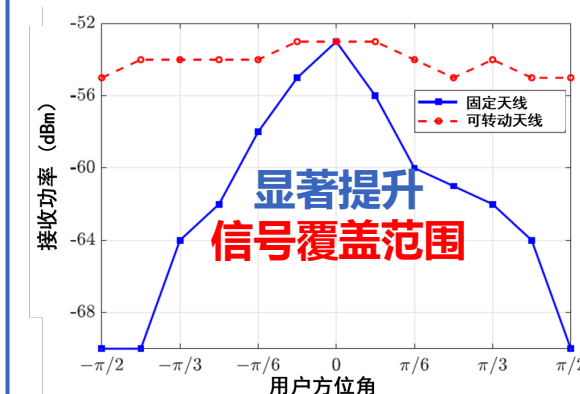
- 利用摄像头获取目标方位信息
- 利用微控制器实现可转向天线角度调控
- 利用USRP实现信号发射/接收

### 实验测试场景

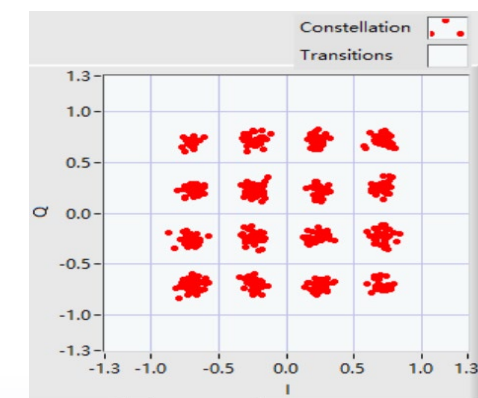


## 实验结果

### 用户接收信号功率



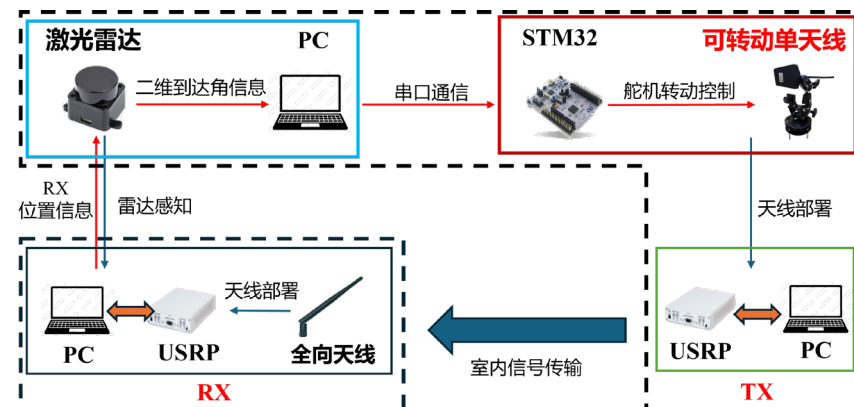
### 用户接收星座图



# 可转向单天线原型

## 基于雷达感知的可转向单天线通信系统

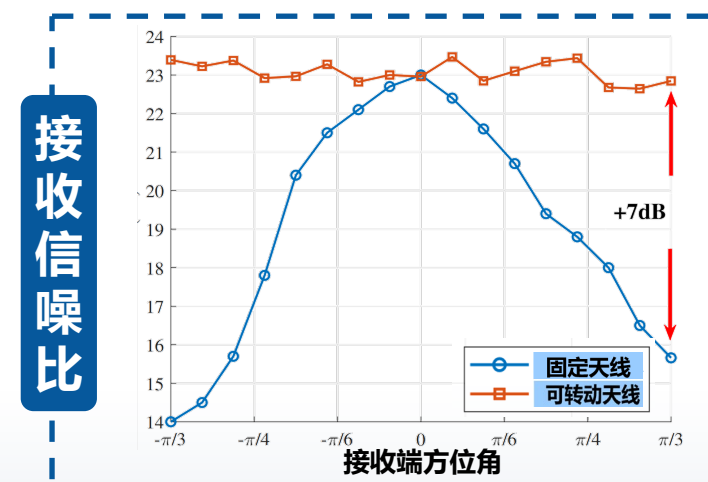
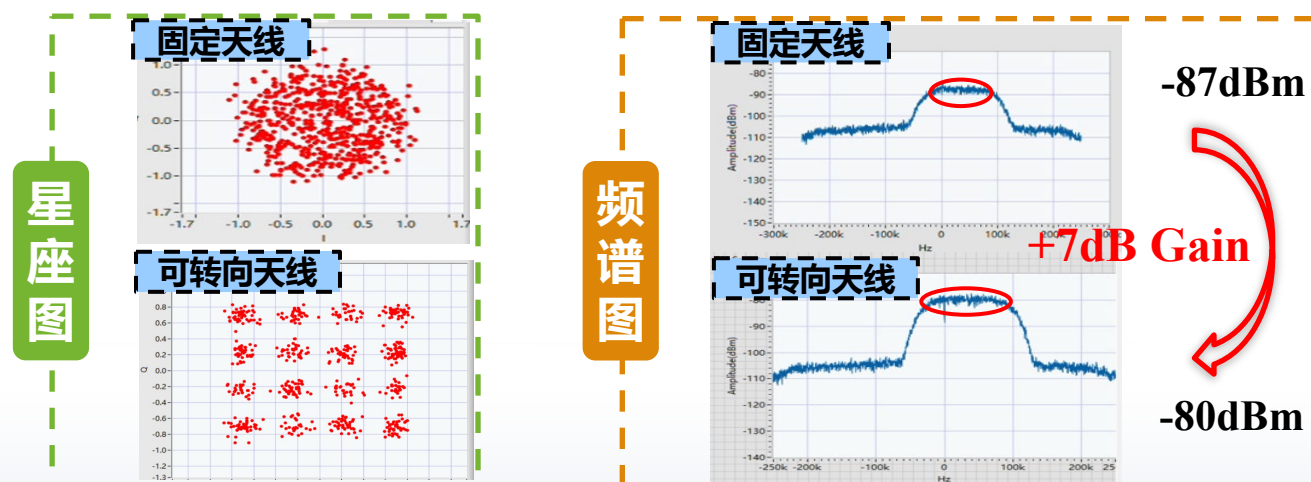
### 系统架构



### 测试场景

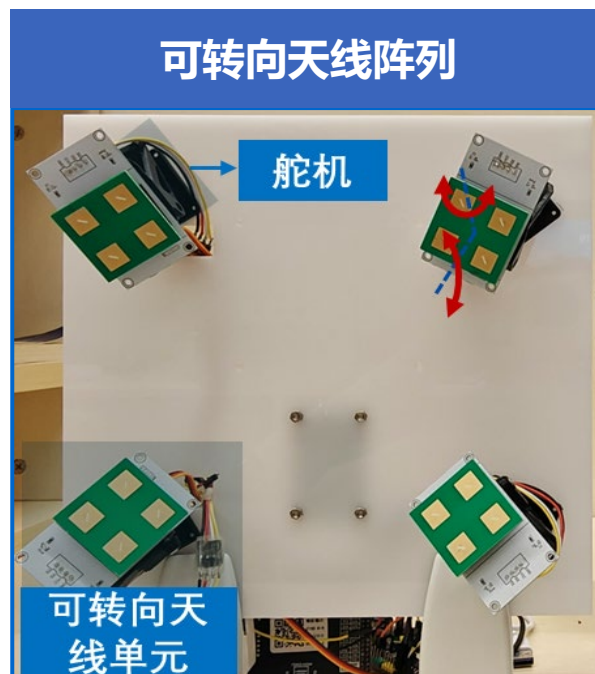


### 测试结果——可转向天线与固定天线对比



# 可转向天线阵列原型

## 可转向天线阵列



## 模拟配备可转向天线的基站与无人机通信场景



| 元件        | 金额 (元) | 元件        | 金额 (元)  |
|-----------|--------|-----------|---------|
| 天线单元 (4个) | 582    | PWM舵机驱动模块 | 27      |
| 舵机云台 (4个) | 137    | 电源适配器     | 30      |
| 亚克力背板     | 30     | 无人机       | 399     |
| FPGA      | 418.89 | 总计        | 1623.89 |

## 学术奖励



2025年IEEE/CIC ICCP

最佳演示奖

# 可转向天线阵列原型

## □ 现有产品

tp-link Archer AXE200 Omni

机械驱动



HUAWEI AirEngine 5760-51

电子驱动





# 华南理工大学

South China University of Technology

1 研究背景

2 基本架构

3 应用前景

4 系统模型

5 关键挑战

6 研究进展

7 原型验证

8 总结展望

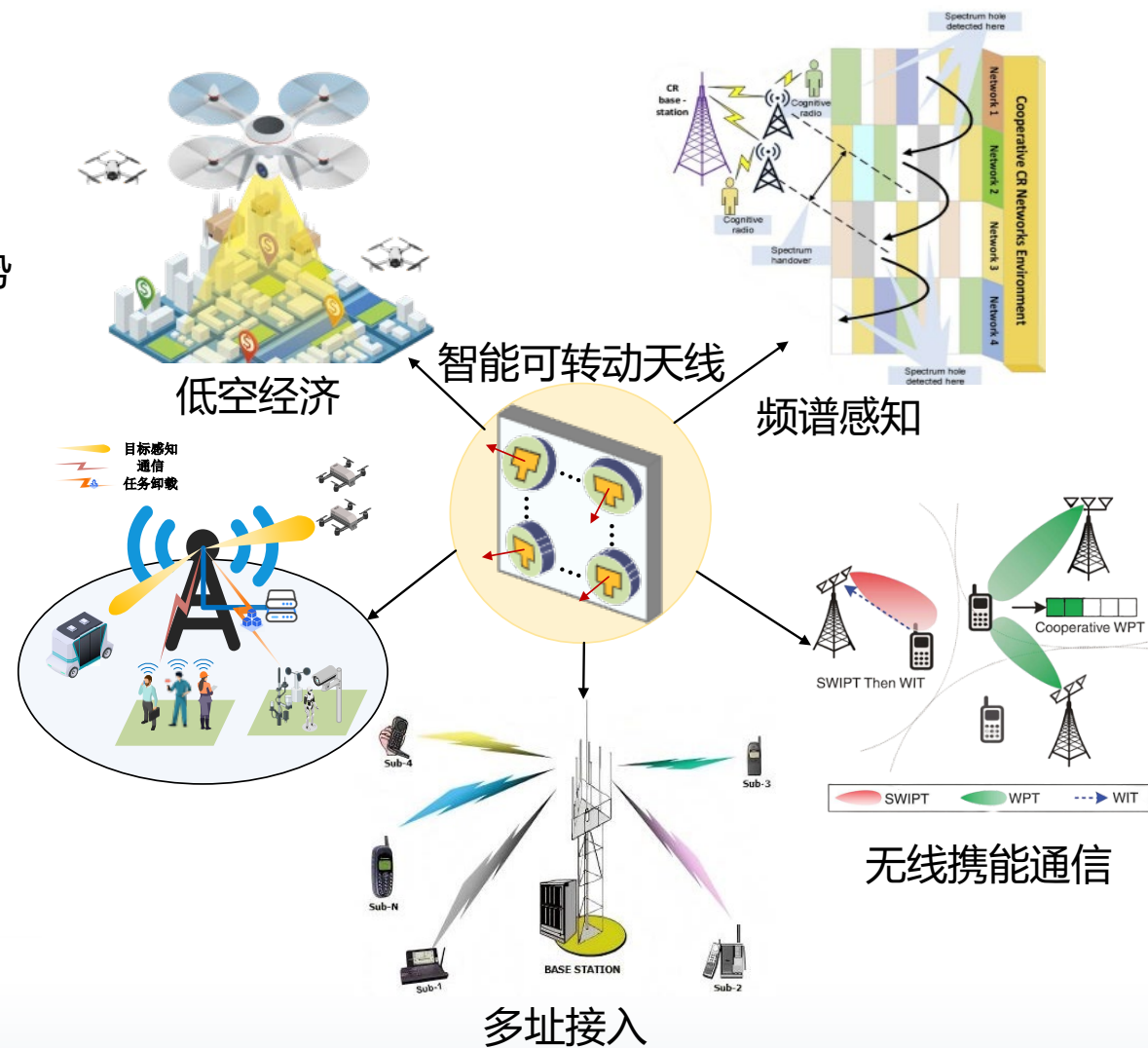
# 总结展望

## □ 总结

- 挖掘新**空间自由度**，灵活调控天线辐射方向
- 软硬协同一体化，实现**自主感知**与**空间定向重构**
- 兼具**干扰抑制**、**多目标**、**高精度**与**多维感知**等优势
- 在6G通信与智能感知领域展现出广阔应用前景
- 构建多场景系统模型，设计**鲁棒优化算法**
- **实测验证**可转向天线，增益显著前景可期

## □ 展望

- 可转向天线系统的**资源分配**
- 基于**统计CSI/信道知识图**的天线视轴调整
- 高效的**天线视轴朝向优化/信道获取算法**
- 可转向天线辅助无线网络的**性能分析**
- 与其他技术的交叉研究：





华南理工大学

South China University of Technology

**Thank you for your attention!**



**Beixiong Zheng (郑倍雄)**  
E-mail: [bxzheng@scut.edu.cn](mailto:bxzheng@scut.edu.cn)  
Tel: (86) 131-2823-8447



 课题组现正招收2026年博士生，欢迎自荐或推荐，谢谢！



Acknowledge to all the collaborators and students.