华南理工大学
South China University of Technology

可转向天线(Rotatable Antenna, RA)
赋能低空通感

郑倍雄

华南理工大学

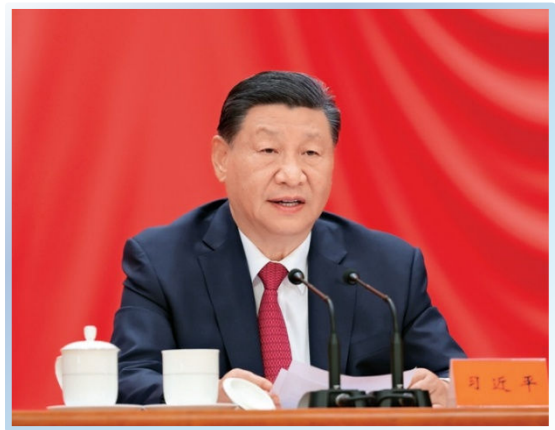
E-mail: bxzheng@scut.edu.cn

2026年11月17日@ RISTA前沿大讲堂

目录
Contents

1 研究背景与需求
2 技术概念与挑战
3 系统模型与进展

低空经济从“新引擎”到成为支撑国民经济高质量发展的新兴支柱产业



习近平总书记
在主持二十届中共中央政治局第十六次集体学习时的重要讲话

“要做好国家空中交通管理工作，促进低空经济健康发展。”

政策定调 锚定“新增长引擎”



《政府工作报告》首次写入“低空经济”

2024年

规范立规 强调“安全健康发展”



《低空经济标准体系建设指南》

2025年

建设提速 加冕“新兴支柱产业”



《关于加强信息通信业能力建设支撑低空基础设施发的实施意见》

2026年

低空经济的发展重心正由产业布局转向信息基础设施能力建设

❑ 低空经济应用持续拓展，市场规模增长潜力巨大，亟需信息基础设施支撑保障

低空经济产业需求持续释放

无人机巡检



规模化、常态化巡检覆盖需求

应急救援



高可靠、应急通信保障需求

低空物流配送



高频次、低成本配送服务需求

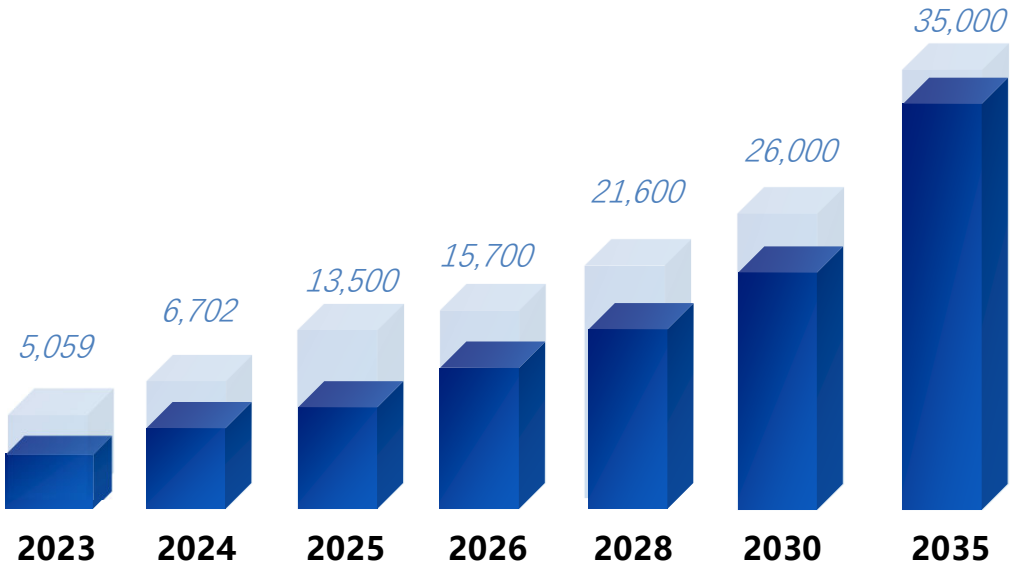
农业植护



规模化、精准化植保作业需求

中国低空经济行业市场规模及预测

单位：亿元/人民币



*数据来源：中国低空经济发展报告、赛迪研究院、中国民航局、中研普华测算

2035年市场规模预计可突破35000亿元

场景扩展与市场增长共同推动低空信息基础设施建设需求和覆盖保障能力升级

❑ 传统地面覆盖基站难以满足低空经济发展，亟需升级“低空通感覆盖”能力



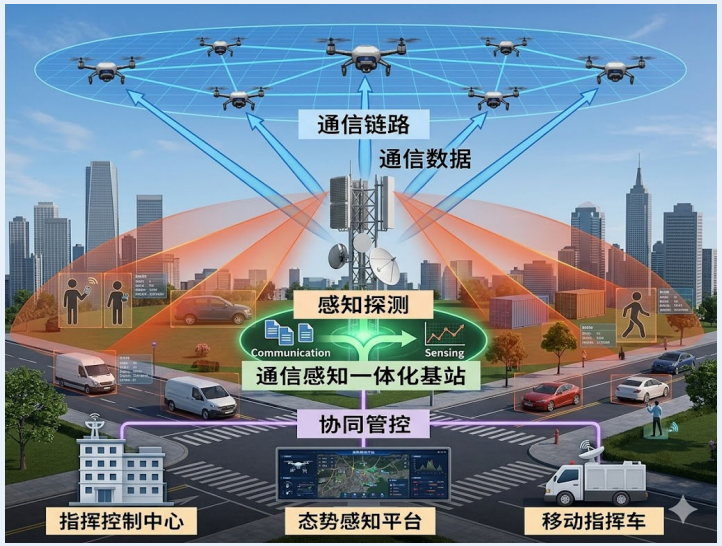
需求1：低空立体覆盖

服务范围由地面平面向低空三维空间延伸



需求2：高动态网络

高机动飞行目标需要更快响应和持续保障能力

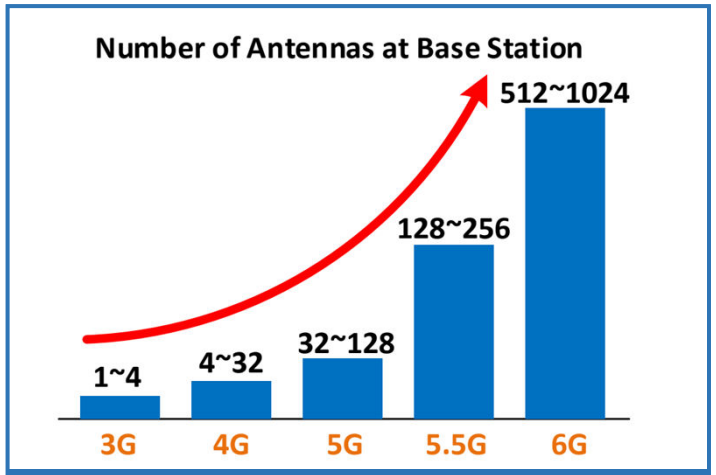


需求3：通感融合支撑

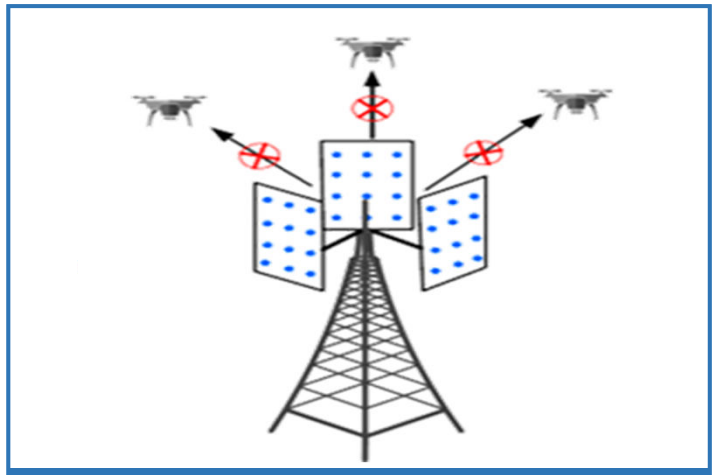
同时支撑通信、感知、跟踪和定位等多元通感业务

技术需求牵引：低空立体覆盖与通感融合亟需新型基站天线架构

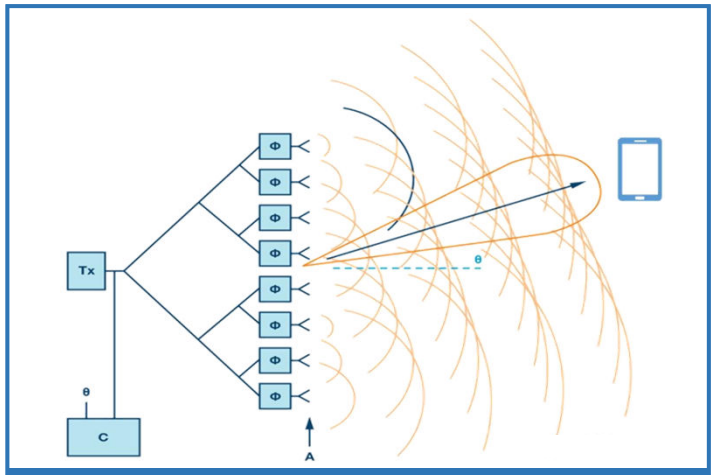
传统固定天线-瓶颈问题



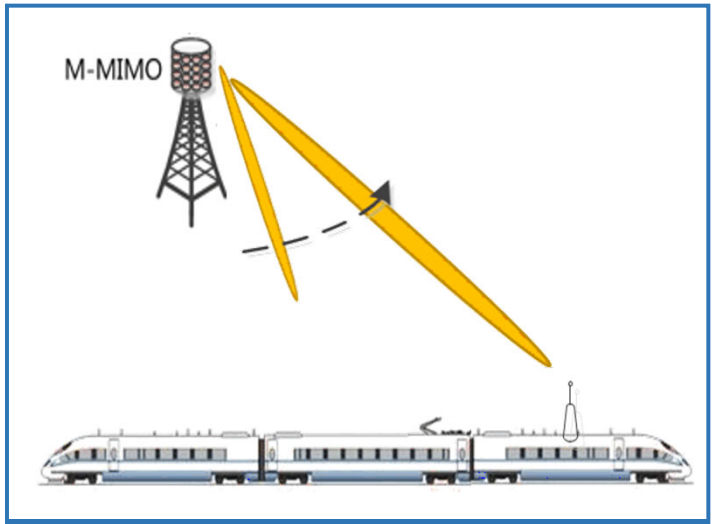
天线成本开销升高



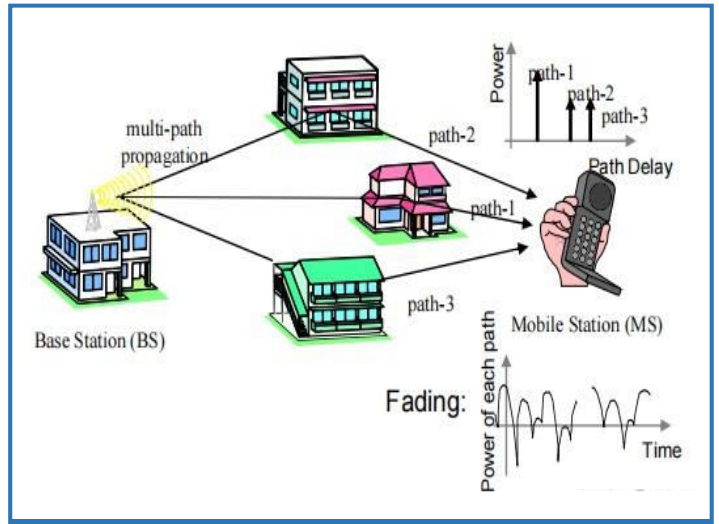
天线空间自由度固化



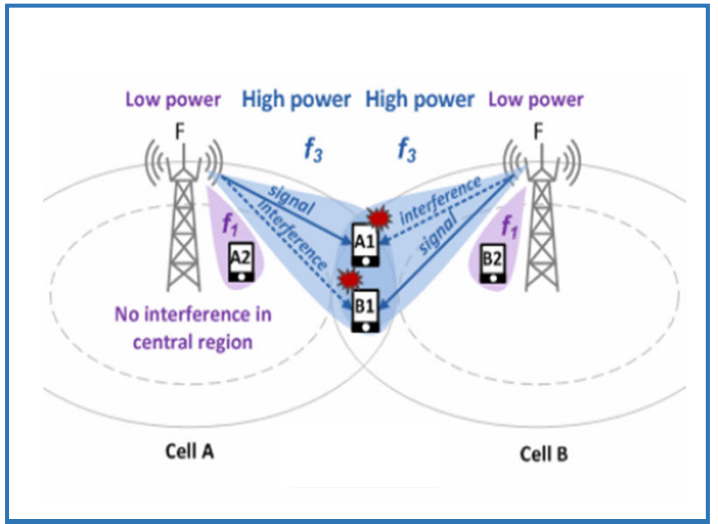
波束控制能力受限



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

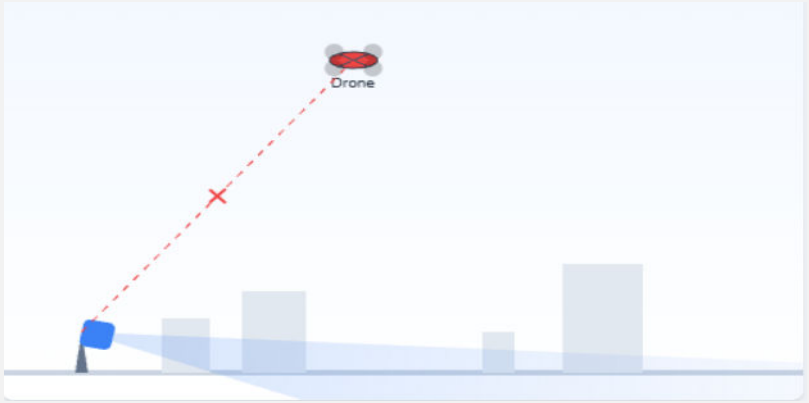
目录
Contents

1 研究背景与需求

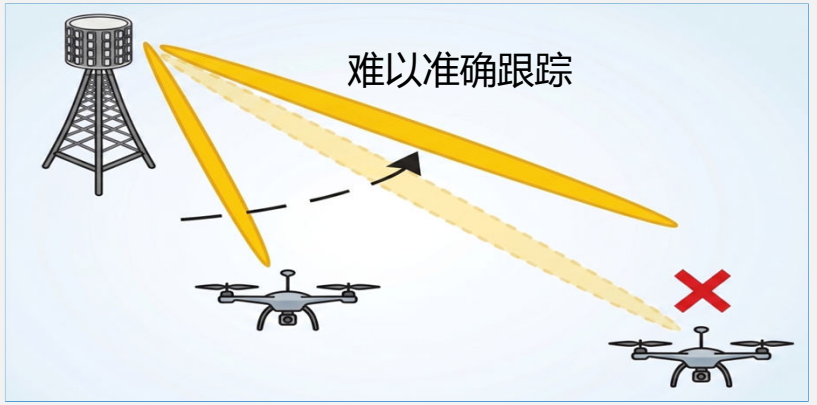
2 技术概念与挑战

3 系统模型与进展

现实瓶颈：现有5G基站以地面覆盖为主，难以有效保障低空飞行任务的安全性与可靠性

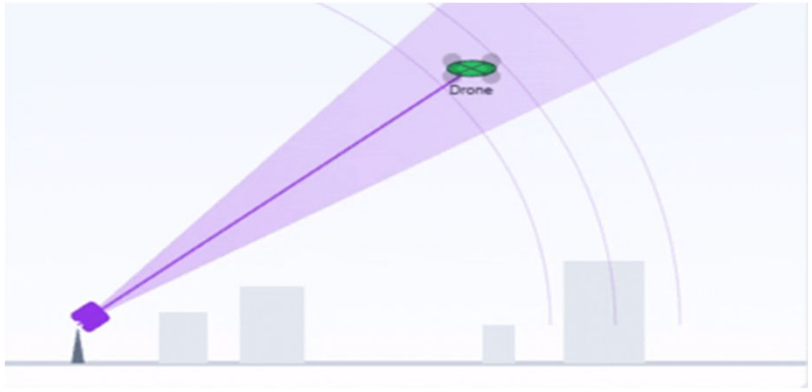


基站天线固定下倾，低空覆盖能力不足

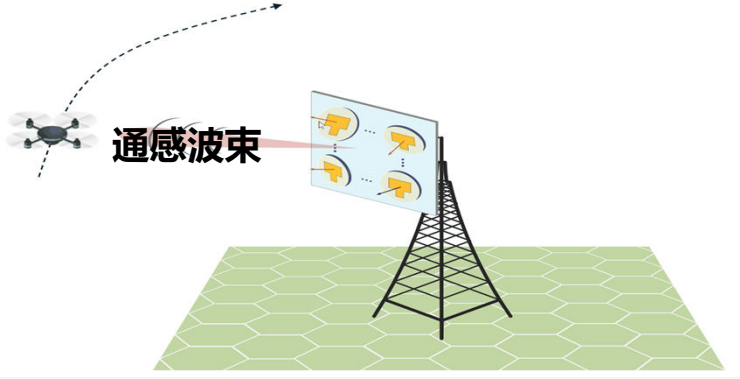


天线缺乏灵活性，高动态目标难跟踪

创新思路：提出可转向天线，引入空间转向自由度，实现立体空间覆盖与目标探测追踪



动态调整天线朝向，实现空地立体覆盖

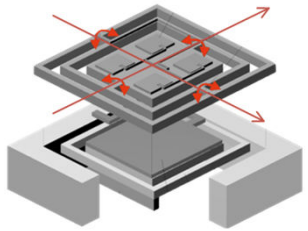


天线转向自由，动态追踪低空通感目标

❑ 可转向天线：引入天线转向自由度，动态调控空间辐射特性，赋能低空通感

实现方式1：机械转向

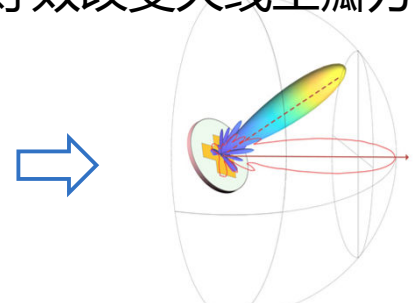
机械转动改变天线物理朝向，等效改变天线主瓣方向



MEMS驱动



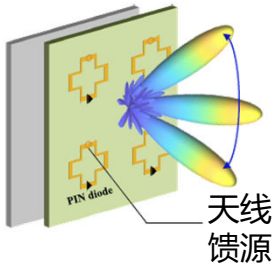
微型电机驱动



响应速度：
毫秒级到秒级

实现方式2: 电子转向

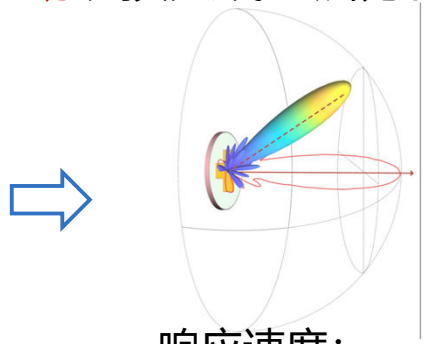
天线物理朝向保持固定，电子驱动切换天线主瓣方向



馈源组合切换

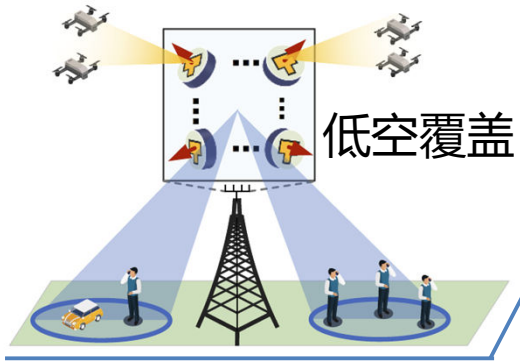


天线振子组合

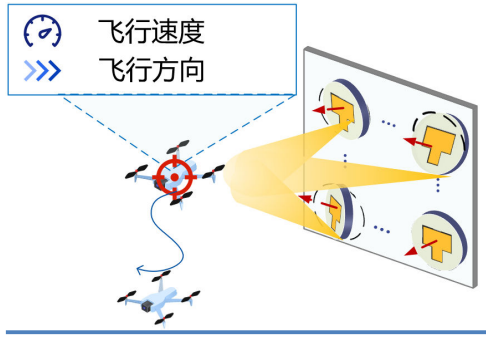


响应速度：
纳秒到微秒级

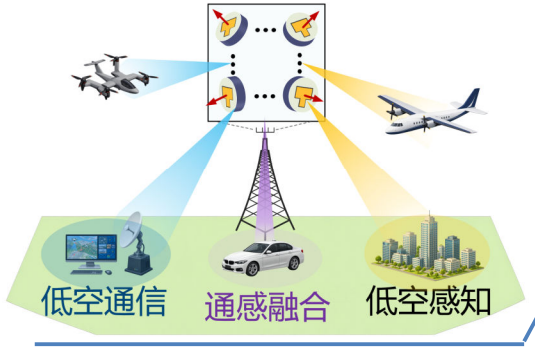
能力支撑



低空立体覆盖



目标感知追踪



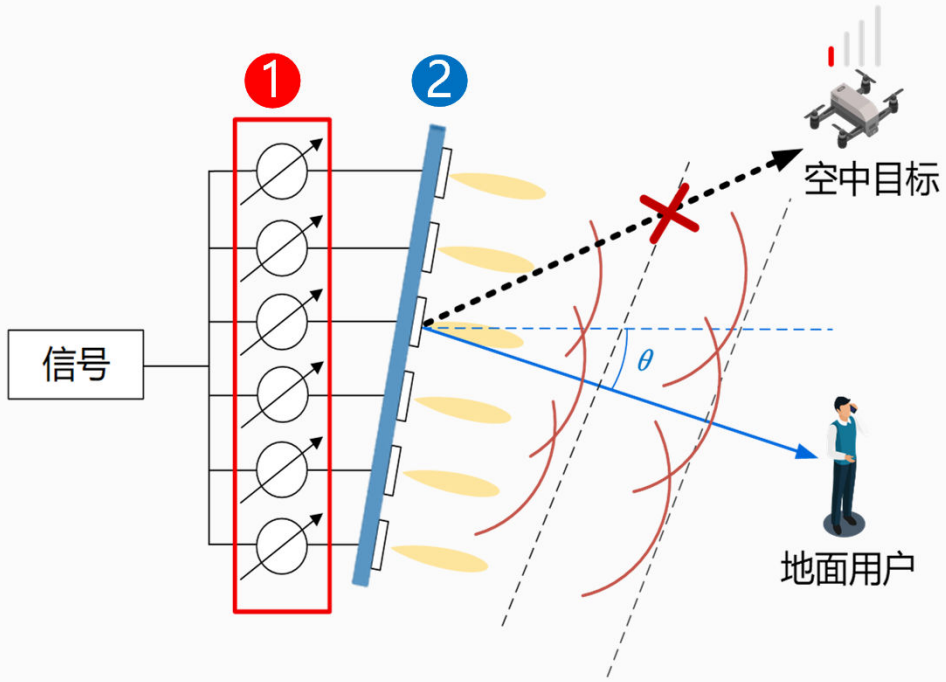
多维通感融合

◆ B. Zheng, Q. Wu, X. Xiong, Y. Tan, T. Ma, Q. Dai, W. Zhu, et al., "Rotatable antenna-empowered wireless networks: A tutorial," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, Nov. 2026. Available: https://arxiv.org/pdf/2603.25559

传统固定天线 vs. 可转向天线

◆ 传统固定天线+波束赋形（相位调控）

天线**朝向固定** + 信号相位控制 → 波束赋形



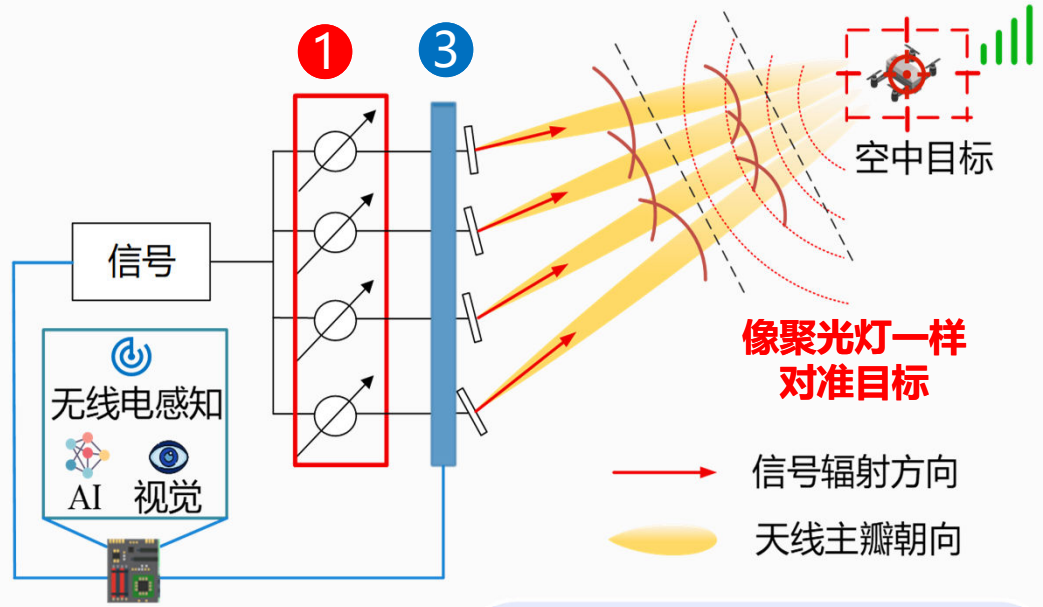
❶ **相位调控：**
相位控制，实现波束赋形/相控阵

❷ **固定天线：**
天线朝向固定，辐射方向不变

<

◆ 可转向天线+波束赋形（相位调控）

天线**朝向可调** + 信号相位控制 → 波束增强与聚焦



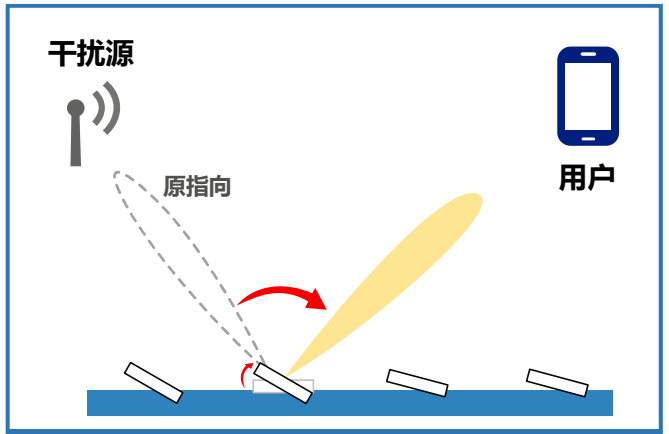
vs.

❶ **相位调控：**
相位控制，实现波束赋形/相控阵

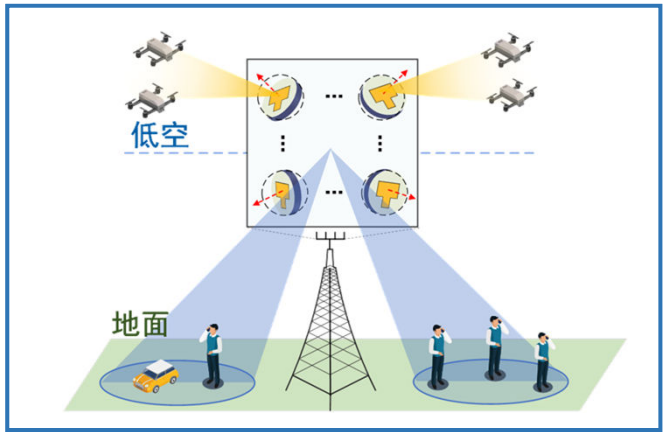
❸ **可转向天线：**
实现天线朝向**可调**，主瓣辐射方向**对准**
⭐**新增空间自由度**

◆ X. Xiong, B. Zheng, W. Wu, W. Zhu, M. Wen, S. Lin, and Y. Zeng, "Intelligent rotatable antenna for integrated sensing, communication, and computation: Challenges and opportunities," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 33, no. 1, pp. 173-180, Feb. 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11251338.

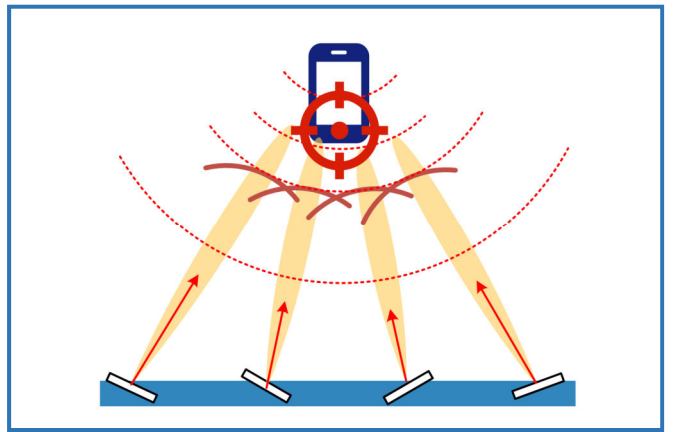
可转向天线-通感性能优势



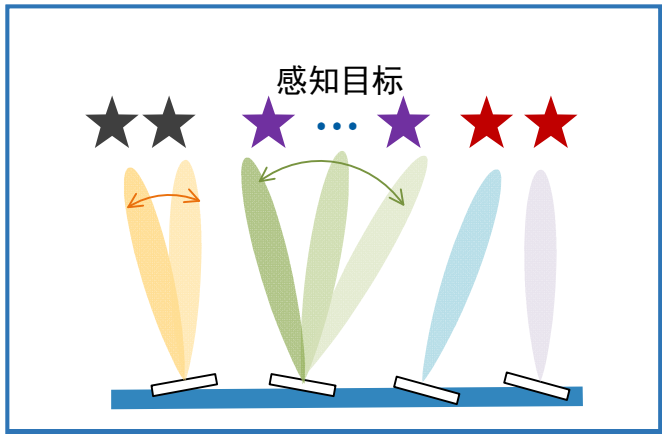
干扰规避



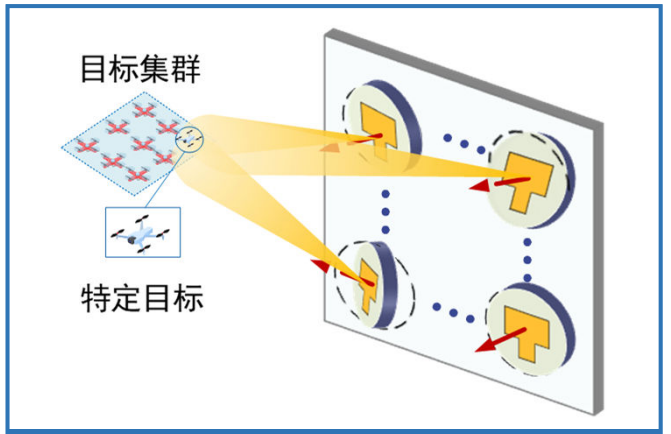
覆盖扩展



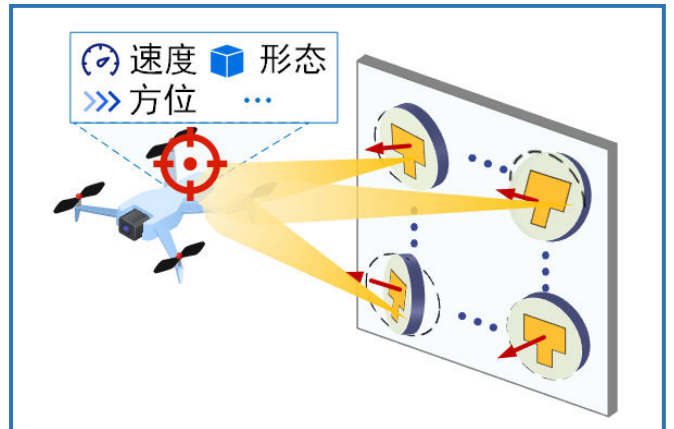
波束聚焦



多目标感知



高精度感知



多维度感知

◆ B. Zheng, T. Ma, C. You, J. Tang, R. Schober, R. Zhang, “Rotatable antenna enabled wireless communication and sensing: Opportunities and challenges”, *IEEE Wireless Commun.*, vol. 33, no. 3, pp. 134-141, Jun. 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11222668.

可转向天线-低空通感前景



◆ B. Zheng, Q. Wu, X. Xiong, Y. Tan, T. Ma, Q. Dai, W. Zhu, et al., "Rotatable antenna-empowered wireless networks: A tutorial," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, Nov. 2026. Available: https://arxiv.org/pdf/2603.25559

可转向天线-其他应用前景



◆ B. Zheng, Q. Wu, X. Xiong, Y. Tan, T. Ma, Q. Dai, W. Zhu, et al., "Rotatable antenna-empowered wireless networks: A tutorial," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, Nov. 2026. Available: https://arxiv.org/pdf/2603.25559

目录
Contents

1 研究背景与需求

2 技术概念与挑战

3 系统模型与进展

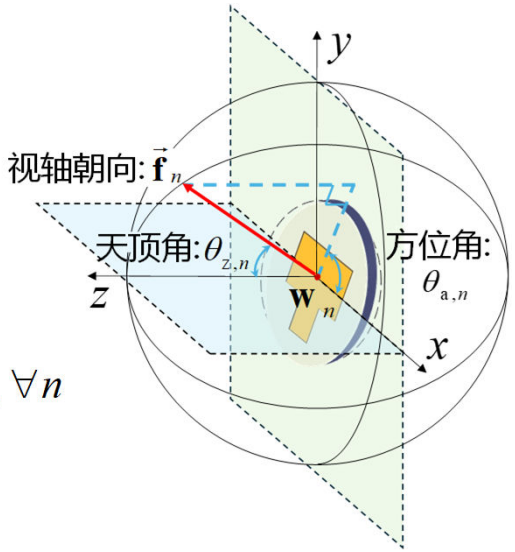
口 天线的物理转动表征与转动范围刻画

天线指向向量

可转向天线的**视轴朝向**可以描述为：

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

- 其中 $f_{x,n} = \sin\theta_{\mathrm{z},n}\cos\theta_{\mathrm{a},n}$，$f_{y,n} = \sin\theta_{\mathrm{z},n}\sin\theta_{\mathrm{a},n}$，$f_{z,n} = \cos\theta_{\mathrm{z},n}$
- $\theta_{\mathrm{z},n}$ 和 $\theta_{\mathrm{a},n}$ 分别表示相对于z轴的**天顶角**和**方位角**
- 单位模量约束：$\left\| \vec{\mathbf{f}}_n \right\| = 1, \forall n$

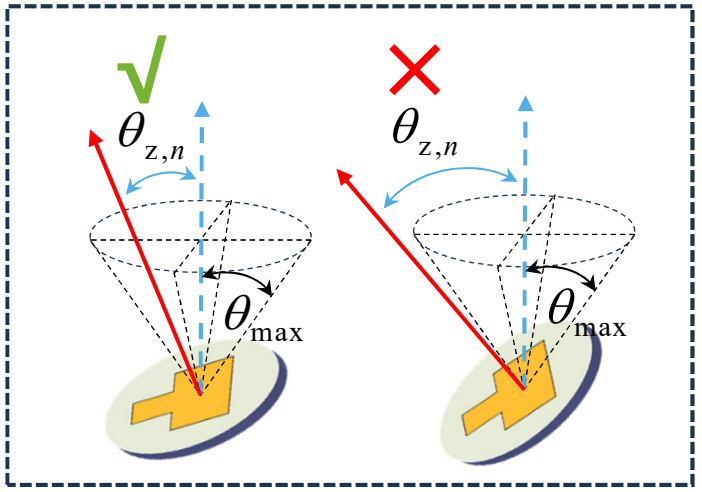


转动范围约束

- 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

$$0 \le \theta_{\mathrm{z},n} \le \theta_{\max}, \forall n \Leftrightarrow \theta_{\mathrm{z},n} = \arccos\left(\vec{\mathbf{f}}_n \mathbf{e}_3\right) = f_{\mathrm{z},n}$$

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



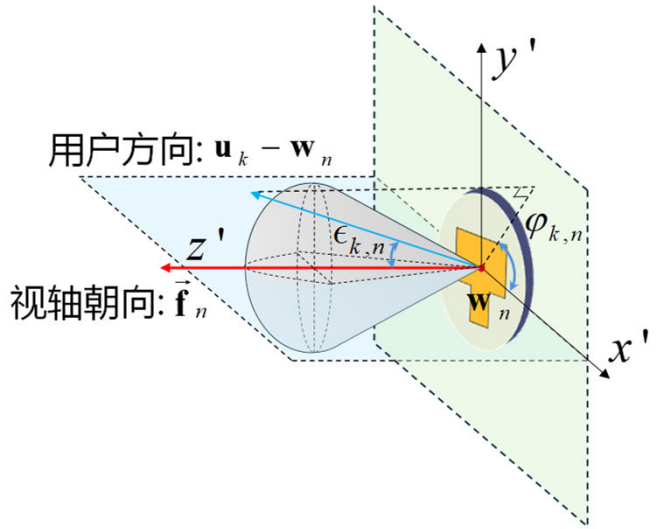
◆ B. Zheng, Q. Wu, T. Ma, and R. Zhang, "Rotatable antenna enabled wireless communication: Modeling and optimization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 74, pp. 6825-6842, Mar. 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11427014

口 天线方向增益图模型与信道功率增益建模

天线方向增益图

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

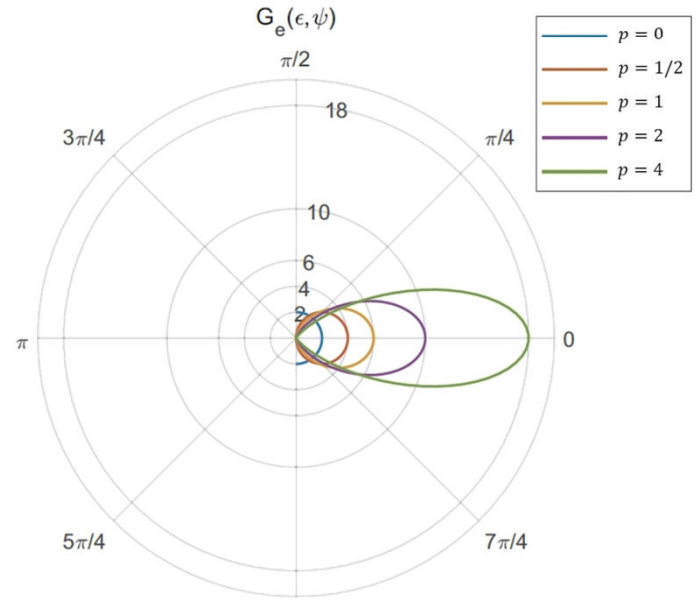
- ϵ,φ：**信号入射角/离开角**（相对于天线视轴朝向）
- $G_0=2(2p+1)$：视轴朝向的**最大方向增益**（功率守恒）
- 方向性因子 p **越大，主瓣越窄，** $G_{\max}$ **越大**



信道功率增益

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

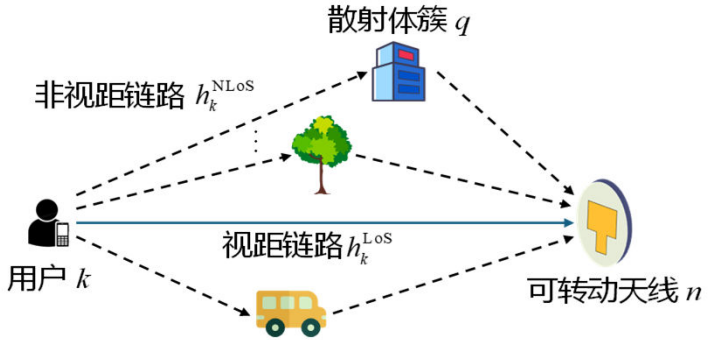
- A：天线辐射孔径　$r_{k,n}$：传播距离　$\vec{\mathbf{u}}_{k,n}=\frac{\mathbf{u}_k-\mathbf{w}_n}{\|\mathbf{u}_k-\mathbf{w}_n\|}$：用户方向向量
- **天线视轴朝向的转动（$\vec{\mathbf{f}}_n$ 的变化）将改变信道的方向增益**



◆ B. Zheng, Q. Wu, T. Ma, and R. Zhang, "Rotatable antenna enabled wireless communication: Modeling and optimization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 74, pp. 6825-6842, Mar. 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11427014

可转向天线信道模型与优化框架

多径几何信道模型



- 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：

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

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

- 基站和用户 k 之间的**多径信道**矢量：

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

- $\mathbf{F}\triangleq\left\{\vec{\mathbf{f}}_1,\vec{\mathbf{f}}_2,\ldots,\vec{\mathbf{f}}_N\right\}\in\mathbb{R}^{3\times N}$ 为所有天线的**指向矩阵**

可转向天线系统的优化设计

$$\begin{aligned}\max_{\mathbf{F},\mathcal{S}}\quad & U(\mathbf{F},\mathcal{S})\\ \text{s.t.}\quad & f_i(\mathbf{F},\mathcal{S})\geq 0,\ \forall i=1,2,\ldots,I_1,\\ & g_i(\mathcal{S})\geq 0,\ \forall i=1,2,\ldots,I_2,\\ & 0\leq\arccos\left(\vec{\mathbf{f}}_n^{T}\mathbf{e}_3\right)\leq\theta_{\max},\ \forall n=1,2,\ldots,N,\\ & \|\vec{\mathbf{f}}_n\|=1,\ \forall n=1,2,\ldots,N\end{aligned}$$

天线转动范围约束

指向向量单位模量约束

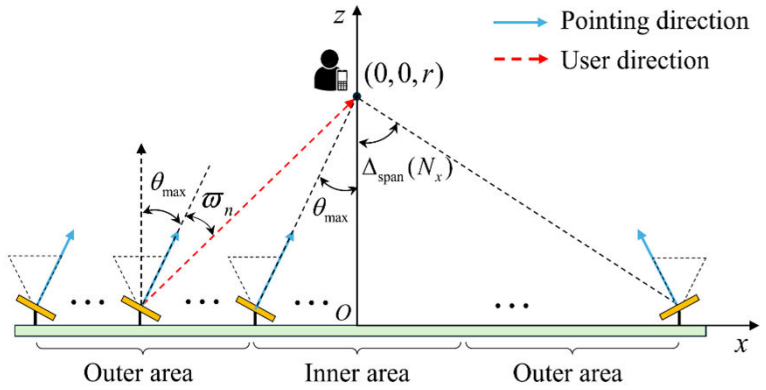
$\mathbf{F}$：所有可转向天线的指向向量

$\mathcal{S}$：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）

◆ B. Zheng, Q. Wu, T. Ma, and R. Zhang, "Rotatable antenna enabled wireless communication: Modeling and optimization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 74, pp. 6825-6842, Mar. 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11427014

□ 推导单用户自由空间传播特殊场景的闭式解与性能分析



- 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**：

$$\max_{\mathbf{f}_n} \quad \cos(\epsilon_n) = \mathbf{f}_n^T \vec{\mathbf{u}}_n$$
$$\text{s.t.} \quad 0 \le \arccos\left(\mathbf{f}_n^T \mathbf{e}_3\right) \le \theta_{\max},$$
$$\|\mathbf{f}_n\| = 1$$

渐进增益： $\dfrac{\lim\limits_{N_x\to\infty}\gamma}{\lim\limits_{N_x\to\infty}\gamma_{\text{fixed}}} = \theta_{\max} + \cos\theta_{\max} \ge 1 \quad (\rho = \dfrac{1}{2})$

最优指向向量的闭式解

$$\vec{\mathbf{f}}_n^{\star} = \left[\sin\theta_{\text{z},n}^{\star}\cos\theta_{\text{a},n}^{\star}, \sin\theta_{\text{z},n}^{\star}\sin\theta_{\text{a},n}^{\star}, \cos\theta_{\text{z},n}^{\star}\right]^T$$

其中：$\theta_{\text{z},n}^{\star} = \min\left\{\arccos\left(\vec{\mathbf{u}}_n^T\mathbf{e}_3\right), \theta_{\max}\right\}$

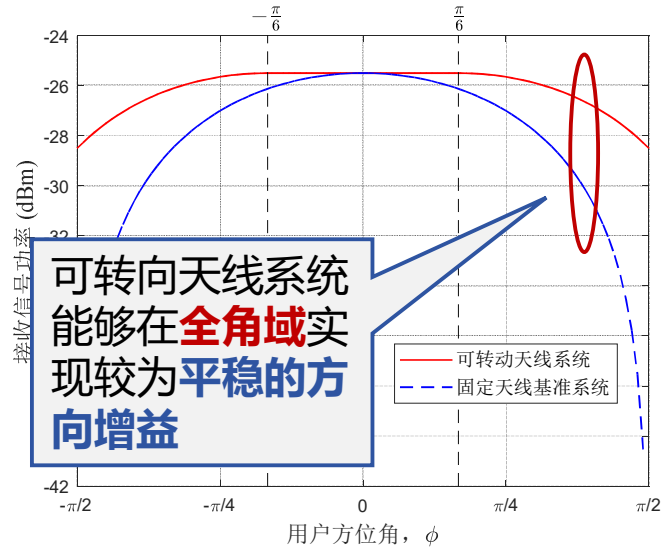
$$\theta_{\text{a},n}^{\star} = \arctan 2\left(\vec{\mathbf{u}}_n^T\mathbf{e}_2, \vec{\mathbf{u}}_n^T\mathbf{e}_1\right)$$

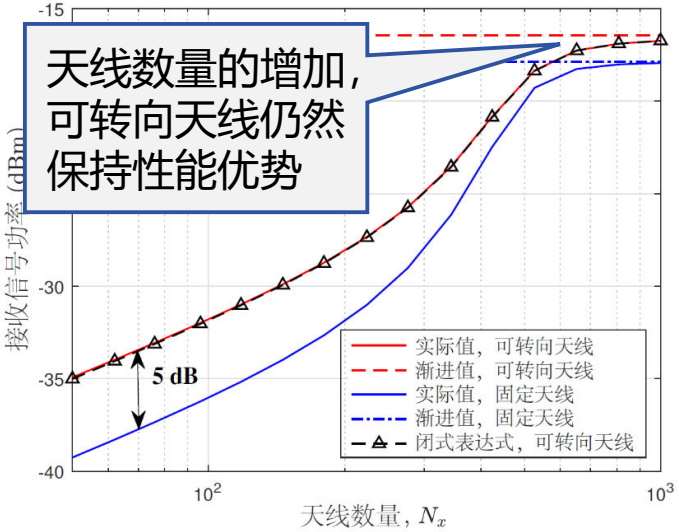
- **转动范围内：** 天线视轴**对准用户方向**，实现最大方向增益
- **转动受限时：** 天线取最大允许天顶转角，尽可能靠近用户方向

接收信噪比闭式表达式

$$\gamma = \begin{cases} \dfrac{2\bar{P}\xi\delta}{\pi}\Delta_{\text{span}}(N_x), & N_x \le \bar{N}_x \\ \dfrac{2\bar{P}\xi\delta}{\pi}\left[\theta_{\max} + \sin\left(\Delta_{\text{span}}(N_x) - \theta_{\max}\right)\right], & N_x > \bar{N}_x, \end{cases}$$

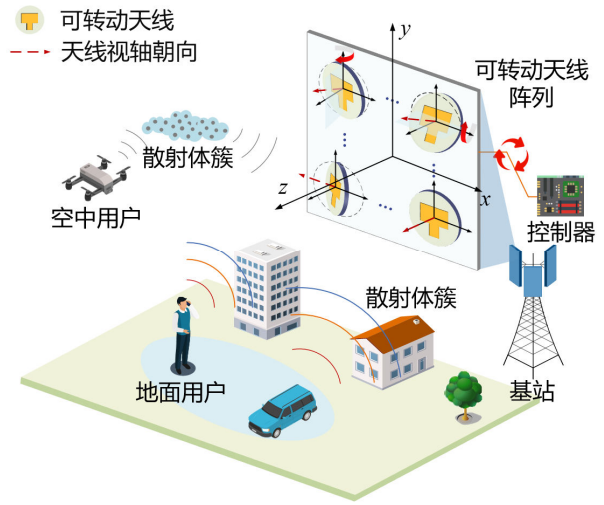
- **阵列规模较小时：** 天线均可对准用户，接收SNR随天线数量**近似线性增长**
- **阵列规模增大后：** 外围天线逐渐受到转动范围限制，SNR增长**逐渐放缓并趋于饱和**





◆ B. Zheng, Q. Wu, T. Ma, and R. Zhang, "Rotatable antenna enabled wireless communication: Modeling and optimization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 74, pp. 6825-6842, Mar. 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11427014

设计面向多用户多径信道场景的交替优化算法和两阶段低复杂度算法



联合优化**波束赋形**和天线**指向向量**，**最大化所有用户中的最小信干噪比**

$$\max_{\mathbf{V},\mathbf{F}} \ \min_{k} \gamma_k = \frac{\bar{P}_k |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k(\mathbf{F})|^2}{\sum_{j\neq k} \bar{P}_j |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_j(\mathbf{F})|^2 + 1}$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \le \arccos(\vec{\mathbf{f}}_n^T \mathbf{e}_3) \le \theta_{\max}, \forall n,$$
$$\|\vec{\mathbf{f}}_n\| = 1, \forall n,$$
$$\|\mathbf{v}_k\| = 1, \forall k$$

交替优化算法

- 考虑最优的**MMSE波束赋形**
- 采用**连续凸近似**求解指向向量优化问题：

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

$$\text{s.t.} \quad \frac{\bar{P}_k |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k(\mathbf{F})|^2}{\sum_{j\neq k} \bar{P}_j |\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_j(\mathbf{F})|^2 + 1} \ge \eta, \forall k, \longrightarrow \text{凸近似处理}$$

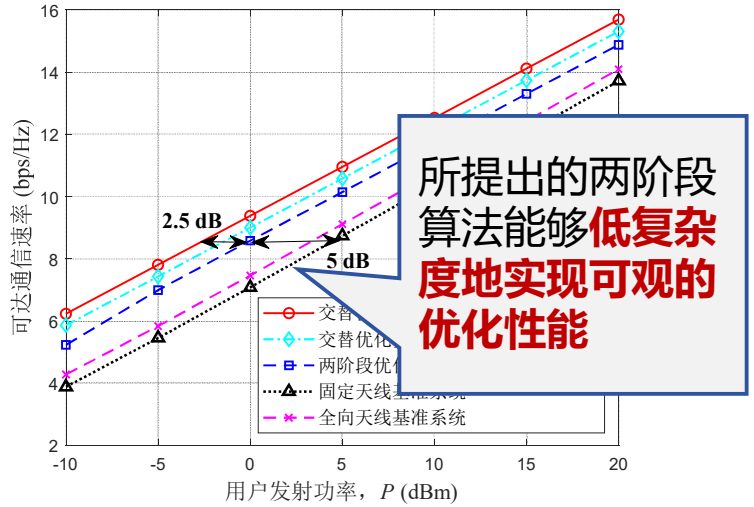
$$\cos(\theta_{\max}) \le \vec{\mathbf{f}}_n^T \mathbf{e}_3 \le 1, \forall n,$$
$$\|\vec{\mathbf{f}}_n\| = 1, \forall k \longrightarrow \text{等式约束松弛} \ \|\vec{\mathbf{f}}_n\| \le 1, \forall k$$

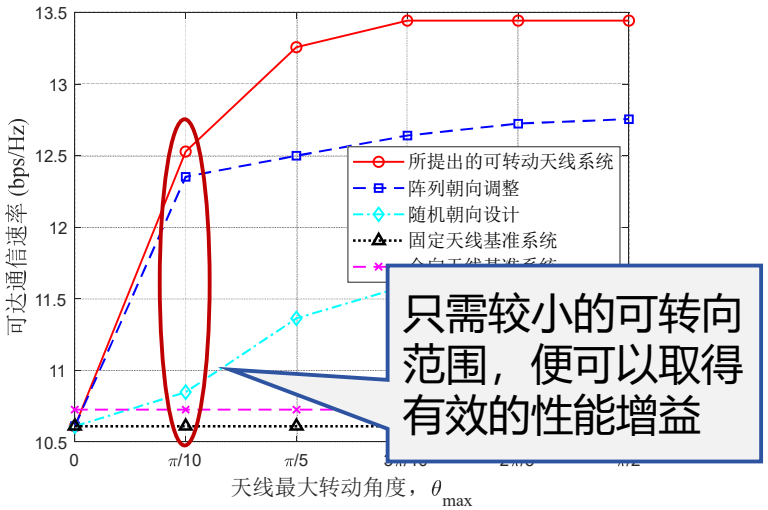
两阶段优化算法

- **ZF波束赋形**和指向向量分阶段设计
- 指向向量优化问题近似为**信道功率增益最大化问题(只需求解一次半正定规划)**：

$$\max_{\omega,\bar{\mathbf{F}}} \ \omega$$

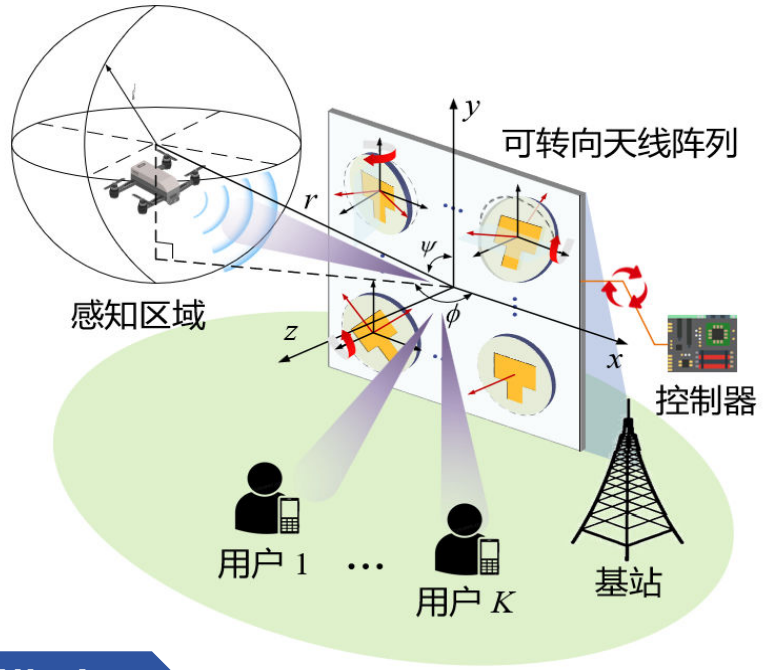
$$\text{s.t.} \quad \rho_k \bar{P}_k \mathrm{Tr}(\mathbf{M}_k \bar{\mathbf{F}}) \ge \omega, \forall k,$$
$$\bar{\mathbf{F}}_{3(n-1)+1,3(n-1)+1} \ge \cos^2 \theta_{\max}, \forall n,$$
$$\mathrm{Tr}(\bar{\mathbf{F}}_{3(n-1)+1:3n,3(n-1)+1:3n}) = 1, \forall n,$$
$$\bar{\mathbf{F}} \succeq \mathbf{0}.$$





◆ B. Zheng, Q. Wu, T. Ma, and R. Zhang, "Rotatable antenna enabled wireless communication: Modeling and optimization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 74, pp. 6825-6842, Mar. 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11427014

多用户下行通信与区域感知的系统模型



在满足所有用户通信速率要求的前提下，最大化感知区域内的最小回波信号功率

- 天线指向矩阵: $\mathbf{F} \triangleq [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \ldots, \mathbf{f}_N]$
- 发射波束赋形矩阵: $\mathbf{V} \triangleq [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \ldots, \mathbf{v}_K]$
- 探测信号协方差矩阵: $\mathbf{S} \triangleq \mathbb{E}[\mathbf{s}[t]\mathbf{s}^H[t]]$

$$\max_{\mathbf{F},\mathbf{V},\mathbf{S}\succeq\mathbf{0}} \ \min_{\mathbf{q}_\mathrm{T}\in\mathcal{A}} P(\mathbf{F},\mathbf{S},\mathbf{q}_\mathrm{T})$$
$$\text{s.t.} \quad R_k(\mathbf{F},\mathbf{V}) \geq R_{\min,k}, \ \forall k,$$
$$\sum_{k=1}^{K} \|\mathbf{v}_k\|^2 \leq P_{\max,\mathrm{c}},$$
$$\mathrm{Tr}(\mathbf{S}) \leq P_{\max,\mathrm{s}},$$
$$0 \leq \arccos\left(\mathbf{f}_n^T \mathbf{e}_3\right) \leq \theta_{\max}, \ \forall n,$$
$$\|\mathbf{f}_n\|^2 = 1, \ \forall n.$$

通信模型

- 通信信道: $\mathbf{h}_\mathrm{U}(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{U},k}) = \mathbf{h}(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{U},k})$
- 用户可达速率:

$$R_k(\mathbf{F},\mathbf{V}) = \log_2\left(1 + \frac{|\mathbf{h}_\mathrm{U}^T(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{U},k})\mathbf{v}_k|^2}{\sum_{j\neq k}|\mathbf{h}_\mathrm{U}^T(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{U},k})\mathbf{v}_j|^2 + \sigma_k^2}\right)$$

天线朝向调节方向增益

⟺

权衡通信与感知性能

感知模型

- 往返感知信道: $\mathbf{H}_\mathrm{T}(\mathbf{F},\mathbf{q}_\mathrm{T}) \triangleq \beta_\mathrm{T}\mathbf{h}(\mathbf{F},\mathbf{q}_\mathrm{T})\mathbf{h}^T(\mathbf{F},\mathbf{q}_\mathrm{T})$
- 回波信号功率:

$$P(\mathbf{F},\mathbf{S},\mathbf{q}_\mathrm{T}) = \mathbb{E}\left\{\|\beta_\mathrm{T}\mathbf{h}(\mathbf{F},\mathbf{q}_\mathrm{T})\mathbf{h}^T(\mathbf{F},\mathbf{q}_\mathrm{T})\mathbf{s}[t]\|^2\right\}$$
$$= |\beta_\mathrm{T}|^2 \|\mathbf{h}(\mathbf{F},\mathbf{q}_\mathrm{T})\|^2 \mathbf{h}^T(\mathbf{F},\mathbf{q}_\mathrm{T})\mathbf{S}\mathbf{h}^*(\mathbf{F},\mathbf{q}_\mathrm{T})$$

◆ Q. Wu, B. Zheng, G. Zhang, and R. Schober, "Antenna orientation optimization for rotatable antenna-enabled ISAC systems," submitted to *IEEE Trans. Wireless Commun.*, May 2026. Available: https://arxiv.org/abs/2606.31466

□ 推导单用户和点目标特殊场景的闭式解与朝向几何规律

最优波束赋形——**最大比传输**(MRT)：

$$\mathbf{v}^{\star}=\sqrt{P_{\max,\mathrm{c}}}\frac{\mathbf{h}^{*}(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{U}})}{\|\mathbf{h}(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{U}})\|}$$

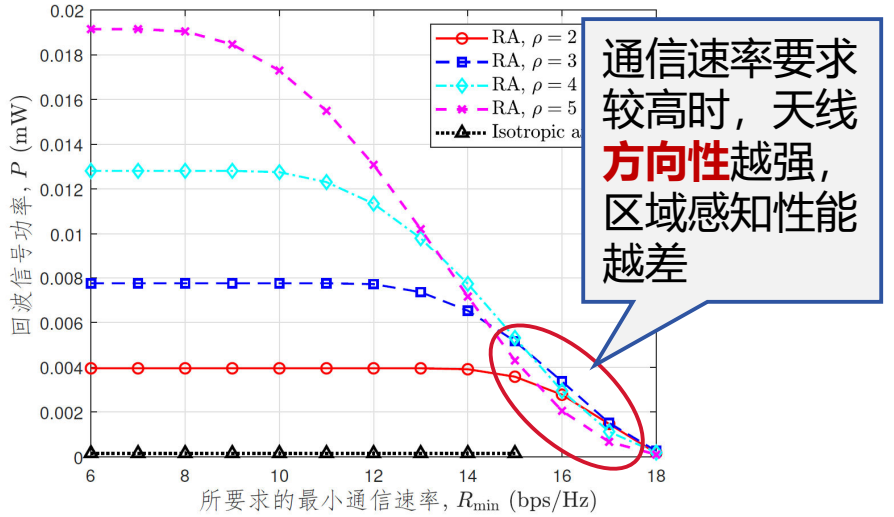
最优感知协方差矩阵——主导感知空间**模态对齐**设计：

$$\mathbf{S}^{\star}=P_{\max,\mathrm{s}}\frac{\mathbf{h}^{*}(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{T}})\mathbf{h}^{T}(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{T}})}{\|\mathbf{h}(\mathbf{F},\mathbf{q}_{\mathrm{T}})\|^{2}}$$

优化问题简化为目标方向和用户方向之间的**方向增益权衡问题**：

$$\max_{\mathbf{F}}\ \left(\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{d_{\mathrm{T},n}^{2}}\left[\mathbf{f}_n^{T}\vec{\mathbf{q}}_{\mathrm{T},n}\right]_{+}^{2\rho}\right)^{2}$$

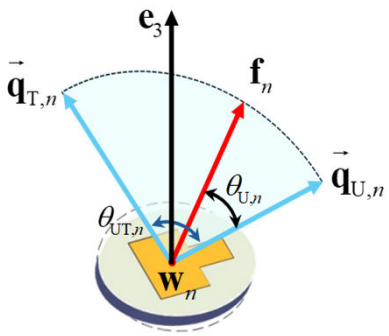
$$\text{s.t.}\ \ \sum_{n=1}^{N}\frac{1}{d_{\mathrm{U},n}^{2}}\left[\mathbf{f}_n^{T}\vec{\mathbf{q}}_{\mathrm{U},n}\right]_{+}^{2\rho}\geq\omega.$$



通信速率要求较高时，天线**方向性**越强，区域感知性能越差

最优朝向存在与两种几何区域

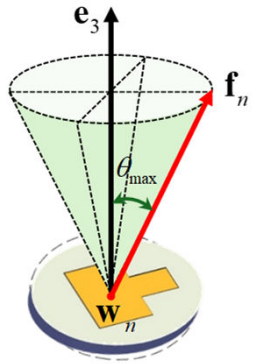
用户-目标扇形区域上



主导因素：**通信-感知性能权衡**

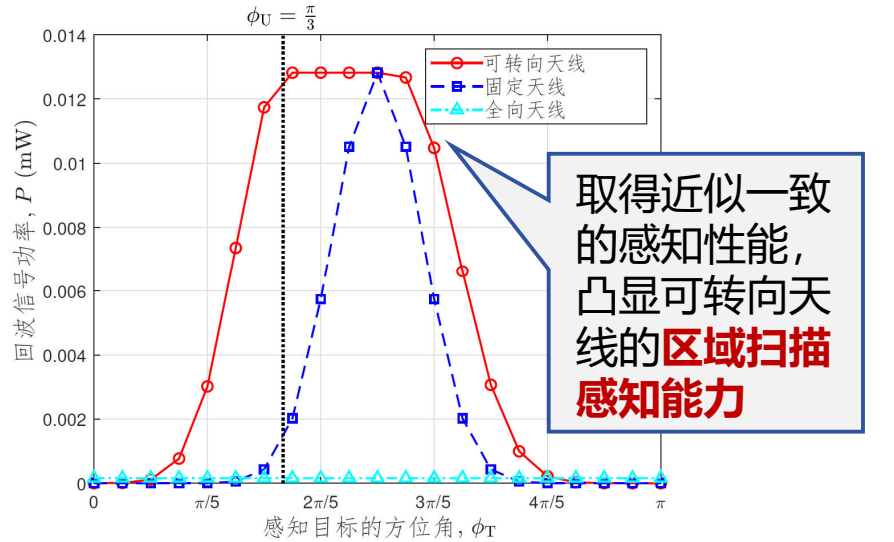
- 朝向在用户和目标方向之间调整
- 权衡通信速率与感知回波功率

可转动范围锥面边界上



主导因素：**天线转动范围限制**

- 期望朝向超出允许转动范围
- 最优朝向位于允许转动锥面的边界



取得近似一致的感知性能，凸显可转向天线的**区域扫描感知能力**

◆ Q. Wu, B. Zheng, G. Zhang, and R. Schober, "Antenna orientation optimization for rotatable antenna-enabled ISAC systems," submitted to *IEEE Trans. Wireless Commun.*, May 2026. Available: https://arxiv.org/abs/2606.31466

设计面向多用户和扩展感知区域一般场景的交替优化算法

- **连续感知区域离散化**

将连续感知区域离散化为M 个空间采样点，将原优化问题近似为

$$\begin{aligned}\max_{\eta,\mathbf{F},\mathbf{V},\mathbf{S}\succeq\mathbf{0}}\quad & \eta\\ \text{s.t.}\quad & P(\mathbf{F},\mathbf{S},\mathbf{q}_{\mathrm{T},m})\geq\eta,\ \forall m,\\ & R_k(\mathbf{F},\mathbf{V})\geq R_{\min,k},\ \forall k,\\ & \sum_{k=1}^{K}\|\mathbf{v}_k\|^2\leq P_{\max,\mathrm{c}},\\ & \mathrm{Tr}(\mathbf{S})\leq P_{\max,\mathrm{s}},\\ & 0\leq\arccos(\vec{\mathbf{f}}_n^T\mathbf{e}_3)\leq\theta_{\max},\ \forall n,\\ & \|\vec{\mathbf{f}}_n\|^2=1,\ \forall n\end{aligned}$$

- **求解方法：交替优化(BCD/AO)**

➢ 将原问题分解为优化通信波束赋形和感知信号协方差矩阵、以及优化天线指向向量两个子问题

➢ 交替迭代优化直至算法收敛

通信感知波束优化子问题

给定天线指向**F**，优化**V**和**S**:

$$\begin{aligned}\max_{\eta,\mathbf{S},\{\mathbf{V}_k\}}\quad & \eta\\ \text{s.t.}\quad & |\beta_{\mathrm{T}}|^2\|\mathbf{h}_{\mathrm{T},m}\|^2\mathbf{h}_{\mathrm{T},m}^T\mathbf{S}\mathbf{h}_{\mathrm{T},m}^*\geq\eta,\ \forall m,\\ & \frac{1}{\bar{\gamma}_k}\mathbf{h}_{\mathrm{U},k}^T\mathbf{V}_k\mathbf{h}_{\mathrm{U},k}^*\geq\sum_{j\neq k}\mathbf{h}_{\mathrm{U},k}^T\mathbf{V}_j\mathbf{h}_{\mathrm{U},k}^*+\sigma_k^2,\ \forall k,\\ & \sum_{k=1}^{K}\mathrm{Tr}(\mathbf{V}_k)\leq P_{\max,\mathrm{c}},\\ & \mathbf{S}\succeq\mathbf{0},\ \mathbf{V}_k\succeq\mathbf{0},\ \forall k,\\ & \mathrm{Tr}(\mathbf{S})\leq P_{\max,\mathrm{s}}\end{aligned}$$

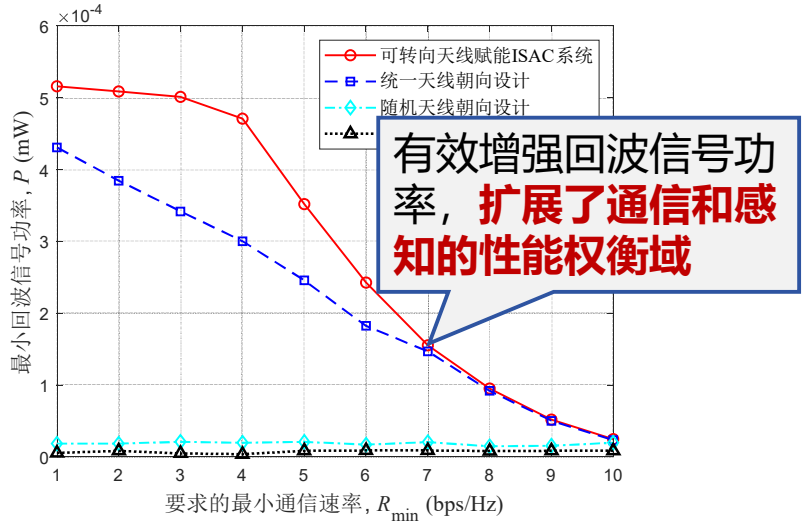
半定松弛

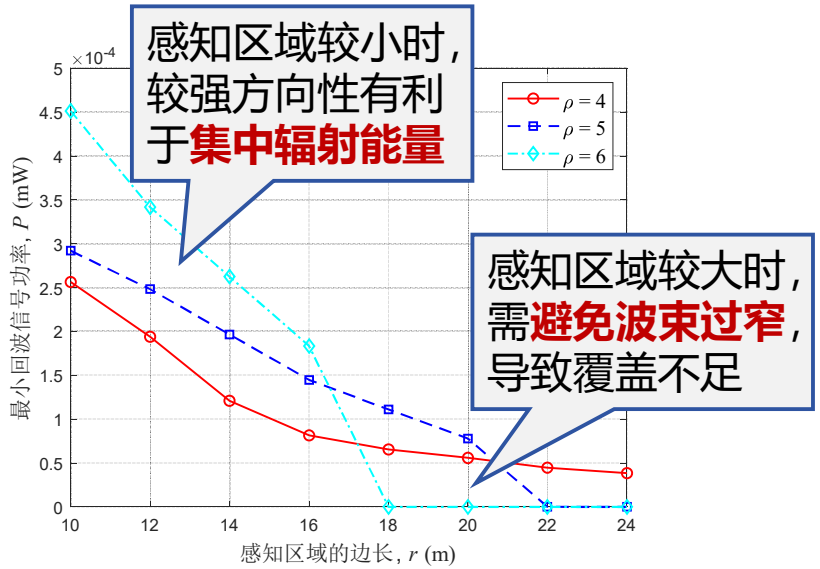
天线视轴朝向优化子问题

给定波束赋形**V**和协方差**S**，优化**F**:

$$\begin{aligned}\max_{\Xi}\quad & \tilde{\eta}\\ \text{s.t.}\quad & |\beta_{\mathrm{T}}|^2\tilde{\mathbf{a}}_{\mathrm{T},m}^T\bar{\mathbf{S}}_m\tilde{\mathbf{a}}_{\mathrm{T},m}\geq\frac{\tilde{\eta}^2}{\delta_m},\ \forall m,\\ & \frac{1}{\bar{\gamma}_k}\tilde{\mathbf{a}}_{\mathrm{U},k}^T\bar{\mathbf{V}}_{k,k}\tilde{\mathbf{a}}_{\mathrm{U},k}\geq\sum_{j\neq k}\tilde{\mathbf{a}}_{\mathrm{U},k}^T\bar{\mathbf{V}}_{k,j}\tilde{\mathbf{a}}_{\mathrm{U},k}+\sigma_k^2,\ \forall k,\\ & \|\tilde{\mathbf{a}}_{\mathrm{T},m}\|^2\geq\delta_m,\ \forall m,\\ & \tilde{a}_{\mathrm{T},m,n}=a_{\mathrm{T},m,n},\ \forall m,n,\\ & \tilde{a}_{\mathrm{U},k,n}=a_{\mathrm{U},k,n},\ \forall k,n,\\ & \cos\theta_{\max}\leq\vec{\mathbf{f}}_n^T\mathbf{e}_3\leq 1,\ \forall n,\\ & \|\vec{\mathbf{f}}_n\|^2\leq 1+\zeta,\ \forall n,\\ & \|\vec{\mathbf{f}}_n\|^2\geq 1-\xi,\ \forall n.\end{aligned}$$

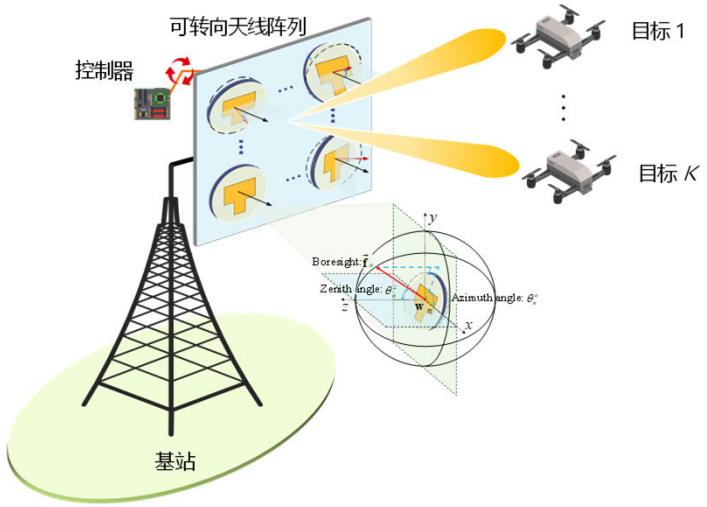
连续凸近似
(利用照明功率表达式关于方向增益的凸性)





◆ Q. Wu, B. Zheng, G. Zhang, and R. Schober, "Antenna orientation optimization for rotatable antenna-enabled ISAC systems," submitted to *IEEE Trans. Wireless Commun.*, May 2026. Available: https://arxiv.org/abs/2606.31466

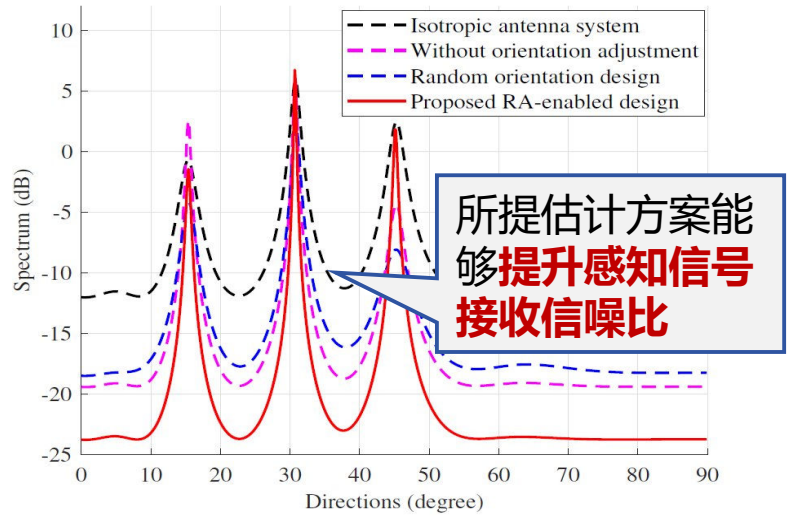
面向低空多目标的高精度方向感知估计



阶段一：目标来波方向估计

- 采用多重信号分类(MUSIC)算法估计低空目标的来波方向
- 基于 RA阵列的有效导向矢量构建空间谱，通过**谱峰搜索获取目标方向信息**

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



感知信道模型

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

辐射方向图系数　　阵列导向矢量

两阶段估计方案

① 利用RA阵列的空间感知能力，实现低空多目标来波方向估计

② 根据估计方向优化天线朝向，增强有效接收增益，提升估计精度

阶段二：可转向天线朝向优化

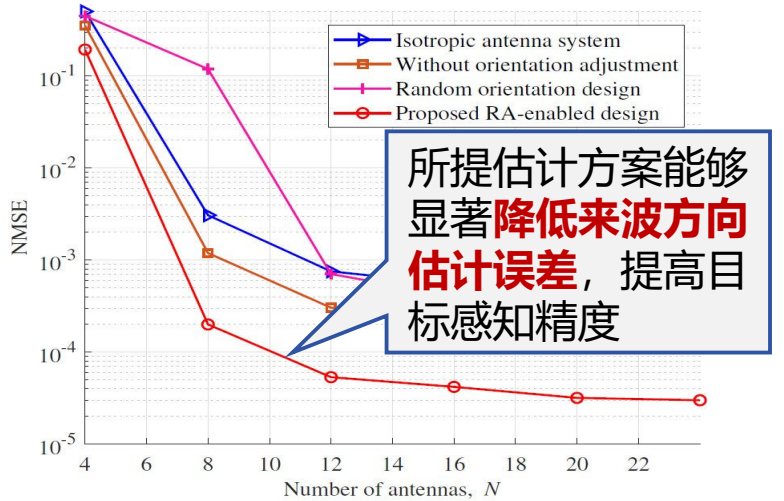
- 基于估计的目标方向，最大化可转向天线阵列的有效接收增益

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

$$\text{s.t.}\quad 0\le\arccos\left(\mathbf{f}_n^T\mathbf{e}_3\right)\le\theta_{\max},\ \forall n,$$

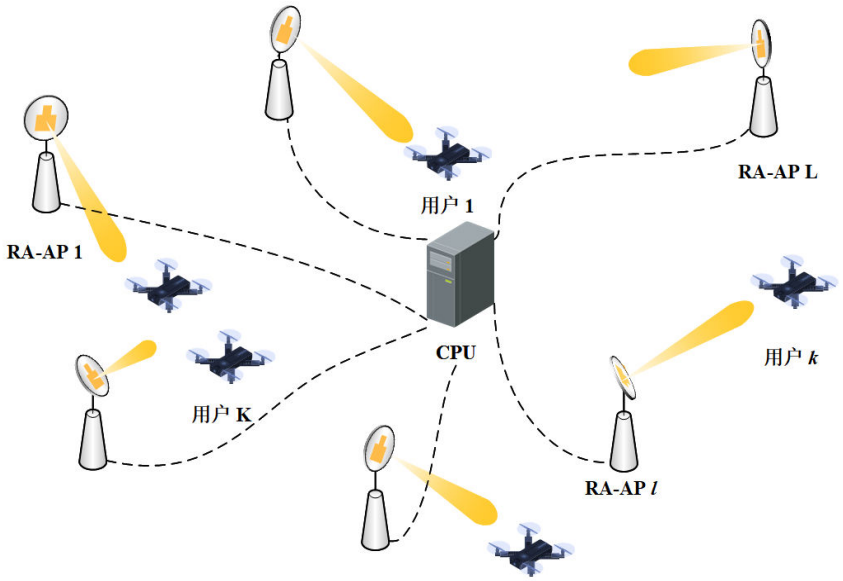
$$\left\|\mathbf{f}_n\right\|^2=1,\ \forall n.$$

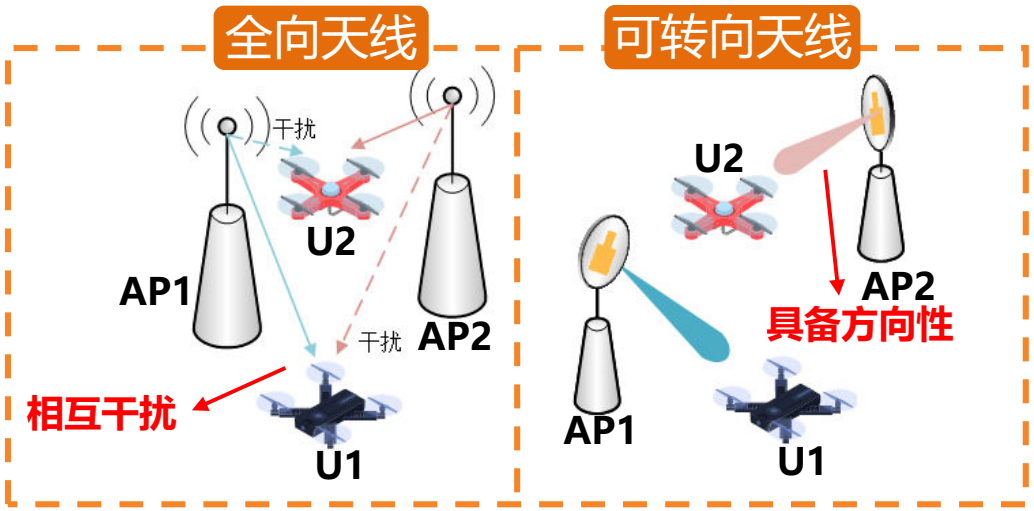
- 采用梯度上升算法求解天线朝向矩阵



◆ X. Xiong, B. Zheng, W. Wu, X. Shao, L. Dai, and M. Zhao, "Efficient channel estimation for rotatable antenna-enabled wireless communication," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 14, No. 11, pp. 3719-3723, Nov. 2025. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11134688

可转向天线辅助低空cell-free系统





改善用户公平性

$$\max_{\boldsymbol{e},\mathbf{B}} \min_{k} \gamma_k$$

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

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

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

仿真实验

- **AP选择策略**

	AP 1	AP l	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**

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

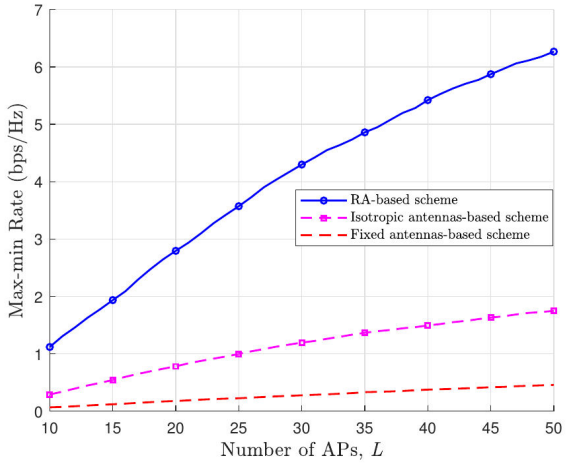
$$\text{s.t.} \ \gamma_k \geq \eta$$

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

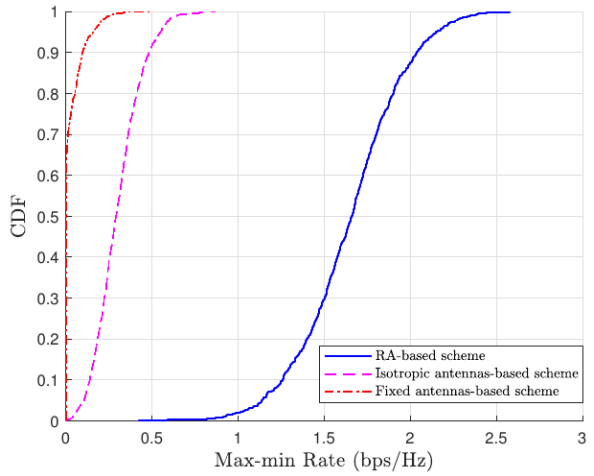
利用**分式规划+SCA近似**得到最优解

仿真实验

- **有效提高最小用户SINR**

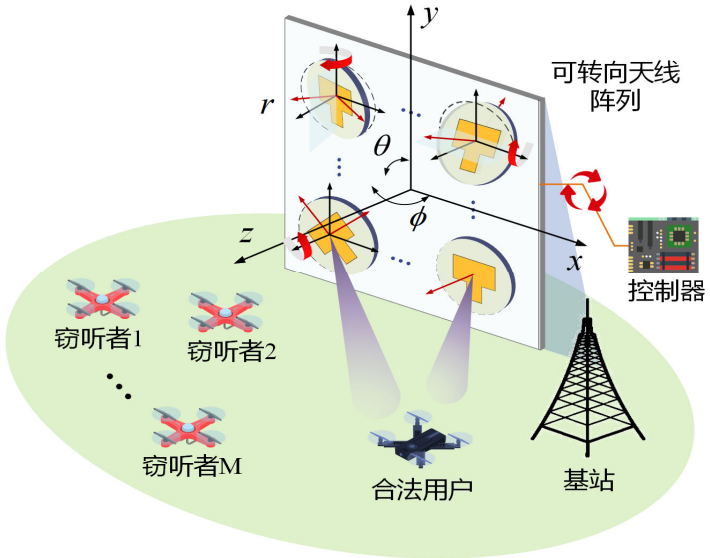


- **显著提高系统公平性**



◆K. Pan, B. Zheng, Y. Tan, F. Chen, E. Björnson, R. Schober, and R. Zhang. “Rotatable antenna-enabled cell-free downlink communication system”, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 15, pp. 3458–3462, 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11535119

□ 可转向天线辅助低空安全通信系统



➢ 信道模型

$$h_{m,k}(\boldsymbol{\theta}_k) = \sqrt{L(d_{m,k})G_{m,k}}\, g_{m,k}$$ 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：$\mathbf{h}_m(\boldsymbol{\Theta}) = [h_{m,1}(\boldsymbol{\theta}_1), h_{m,2}(\boldsymbol{\theta}_2), , \ldots, h_{m,K}(\boldsymbol{\theta}_K)]^T$

➢ 合法用户/窃听者可达速率

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

最大化安全速率

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

波束赋形设计

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

利用**广义瑞利熵**得到最优解

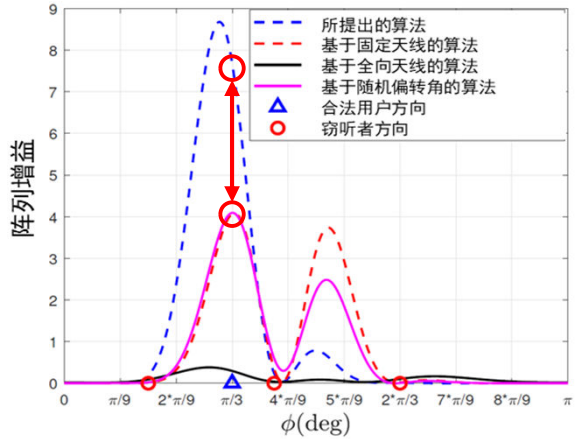
可转向天线姿态角设计

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

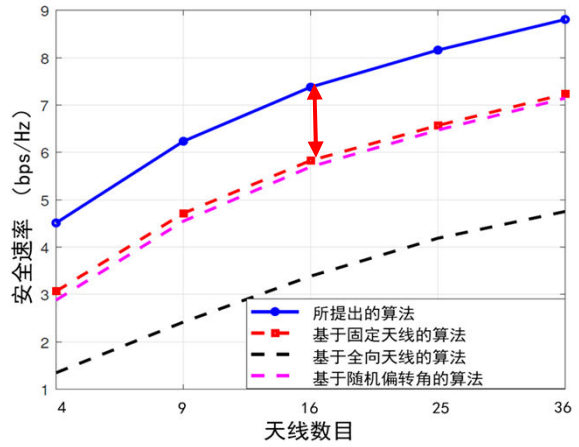
利用**SCA近似求解**线性方程

仿真实验

- **显著提升**合法用户处阵列增益

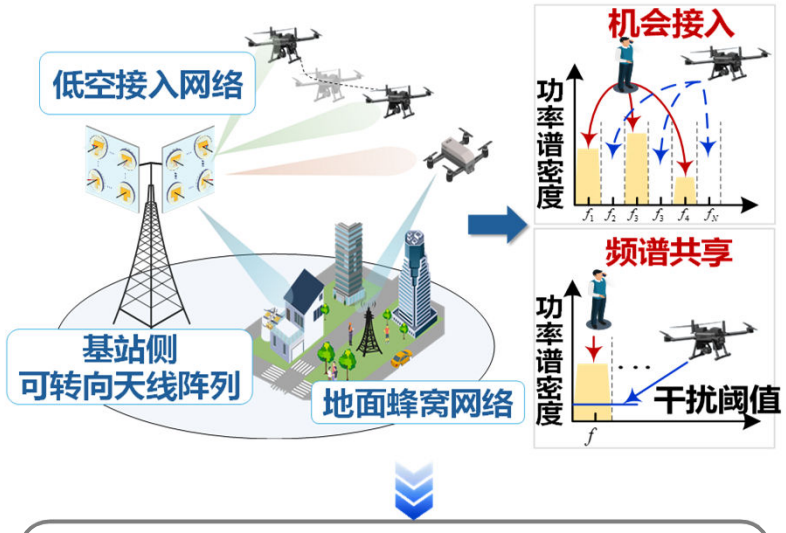


- **有效提高**系统安全速率

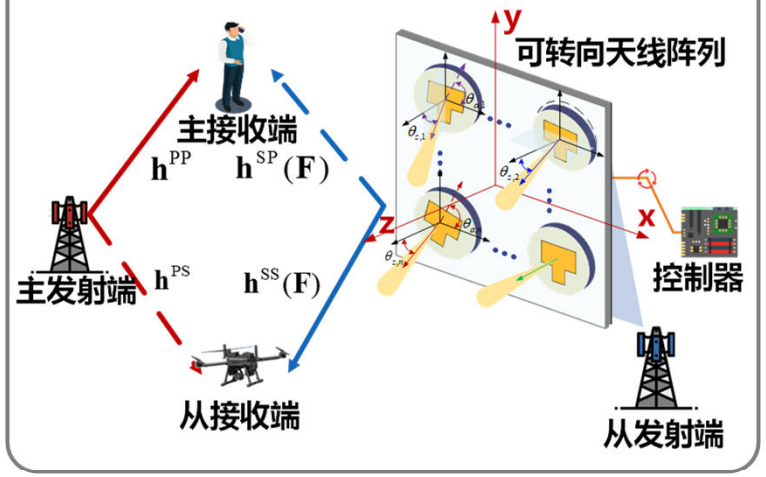


◆ L. Dai, B. Zheng, Q. Wu, C. You, R. Schober and R. Zhang, "Rotatable antenna-enabled secure wireless communication," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 3440-3444, Nov. 2025. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11098736

可转向天线辅助低空认知通信系统



可转向天线辅助低空频谱共享



满足主用户干扰约束下
最大化从用户信干噪比

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

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

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

$$\left|\mathbf{w}^H\mathbf{h}^{SP}(\boldsymbol{\Theta})\right|^2 \le \Gamma.$$

从用户发射端**功率约束**

干扰温度约束

交替优化算法求解

固定天线的**偏转角**

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

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

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

基于正交投影与几何分析推导闭式解

固定**波束赋形矩阵**

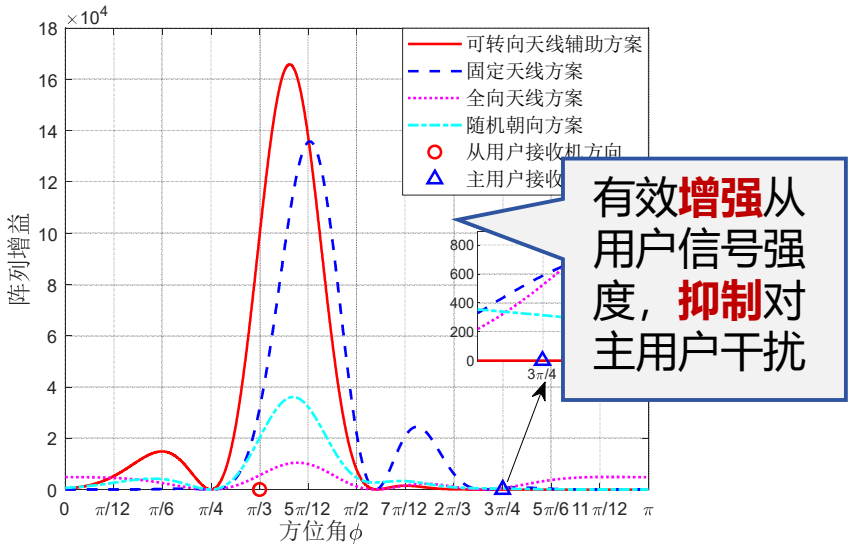
$$\max_{\mathbf{F}} \quad \left|\mathbf{w}^H\mathbf{h}^{SS}(\mathbf{F})\right|^2$$

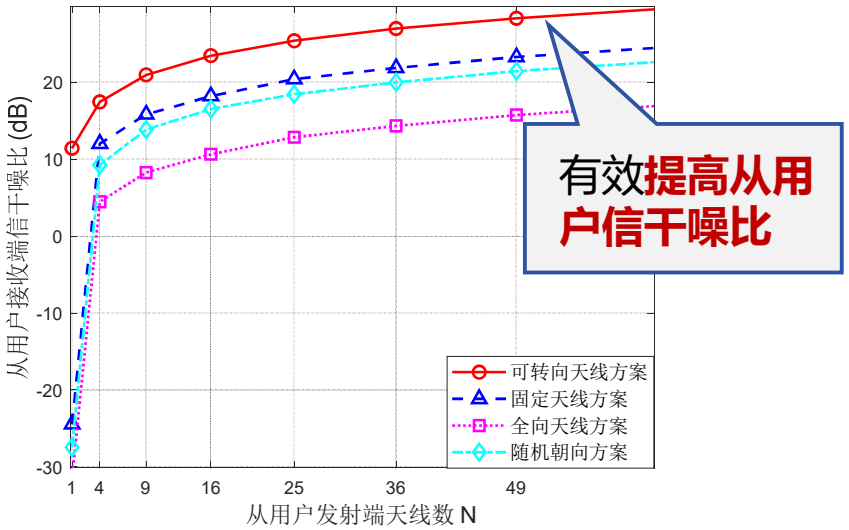
$$\text{s.t.} \quad \mathbf{f}_n^T\mathbf{e}_3 \ge \cos(\theta_{\max}), \forall n,$$

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

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

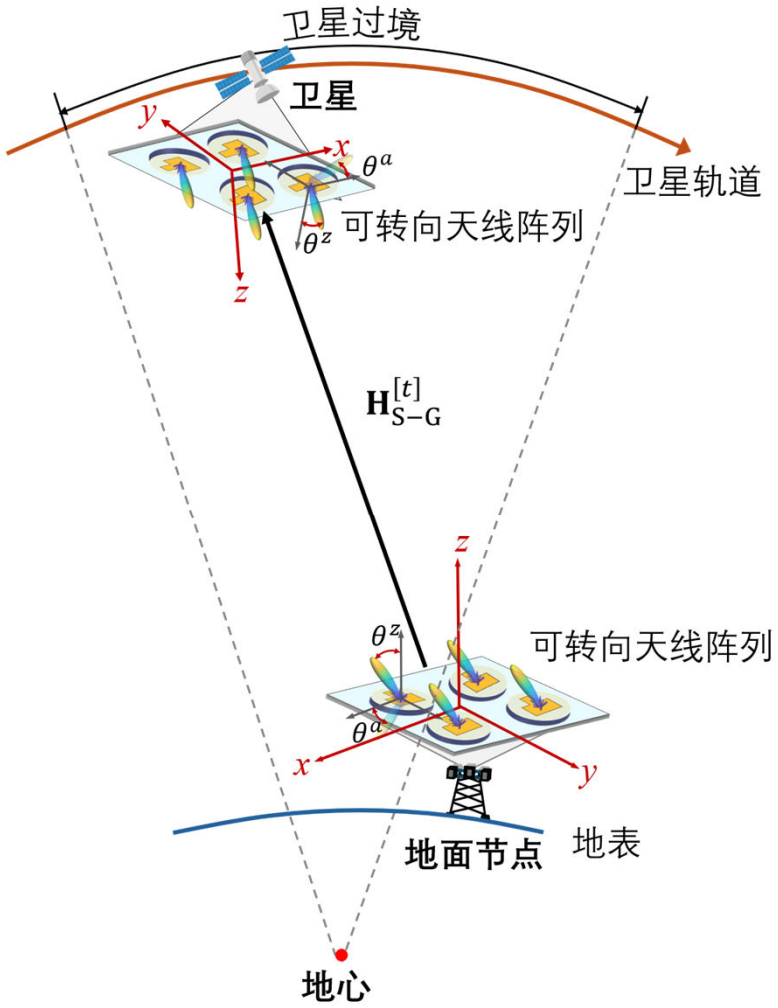
基于SCA近似与构造二次上界求解方程





◆ Y. Tan, B. Zheng, Y. Fang, D. W. Kwan Ng, J. Xu, and R. Zhang, "Rotatable antenna-enabled spectrum sharing in cognitive radio systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 15, pp. 1732-1736, Jan. 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11347570

低轨卫星通信系统的波束对齐与追踪设计



波束对齐设计

- **远场LoS信道模型**

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{S-G}} = \rho_{\mathrm{S-G}}\, \boldsymbol{b}_{\mathrm{S}}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{S}}; \varphi_{\mathrm{S}}, \vartheta_{\mathrm{S}})\boldsymbol{b}_{\mathrm{G}}^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{G}}; \varphi_{\mathrm{G}}, \vartheta_{\mathrm{G}})$$

$$\boldsymbol{b}_{\mathrm{X}} = \underbrace{\boldsymbol{g}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{X}})}_{\text{天线方向增益}} \odot \underbrace{\boldsymbol{a}(\varphi_{\mathrm{X}}, \vartheta_{\mathrm{X}})}_{\text{阵列响应矢量}}, \quad \mathrm{X} \in \{\mathrm{G}, \mathrm{S}\}$$

- **优化问题：最大化星地有效信道增益**

$$(\mathrm{P1}): \max_{\mathbf{F}_{\mathrm{G}}, \mathbf{F}_{\mathrm{S}}, \mathbf{w}_{\mathrm{G}}, \mathbf{w}_{\mathrm{S}}} \gamma(\mathbf{F}_{\mathrm{G}}, \mathbf{w}_{\mathrm{G}}, \mathbf{F}_{\mathrm{S}}, \mathbf{w}_{\mathrm{S}}) = \left|\boldsymbol{w}_{\mathrm{G}}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{H}_{\mathrm{S-G}} \boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}\right|^2$$

⇩ 利用信道秩一特性解耦优化问题

投影最大化问题

$$(\mathrm{P2}): \max_{\vec{\mathbf{f}}_{\mathrm{X},i}} \ (\vec{\mathbf{f}}_{\mathrm{X},i}^{\mathrm{T}} \vec{\mathbf{u}}_{\mathrm{X}})^{2p} \quad \text{s.t.} \quad (10\mathrm{c}), (10\mathrm{d}).$$

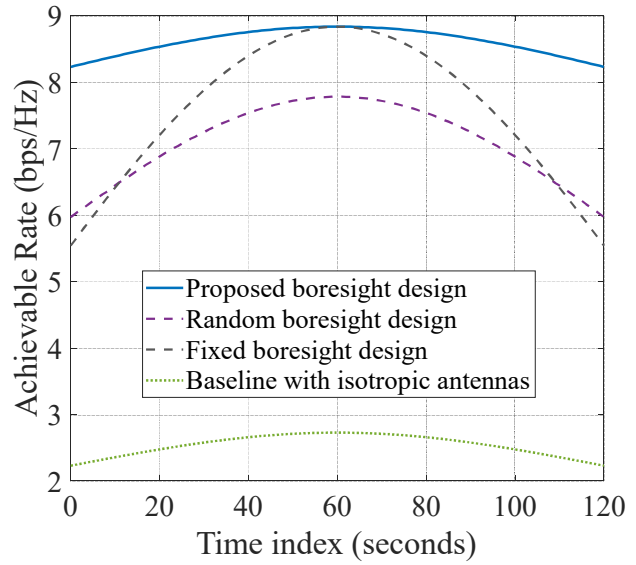
最优收发波束赋形

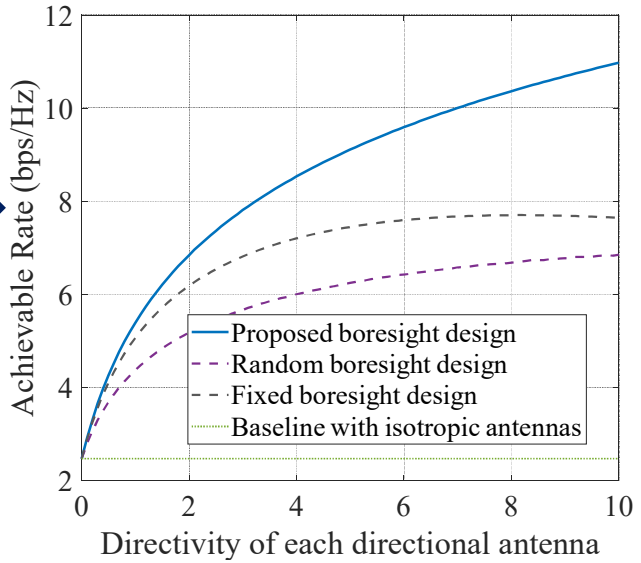
最大比传输/合并

$$\mathbf{w}_{\mathrm{X}}^{\star} = \frac{\mathbf{b}_{\mathrm{X}}^{*}}{\|\mathbf{b}_{\mathrm{X}}\|}, \quad \forall \mathrm{X} \in \{\mathrm{G}, \mathrm{S}\}$$

最优解

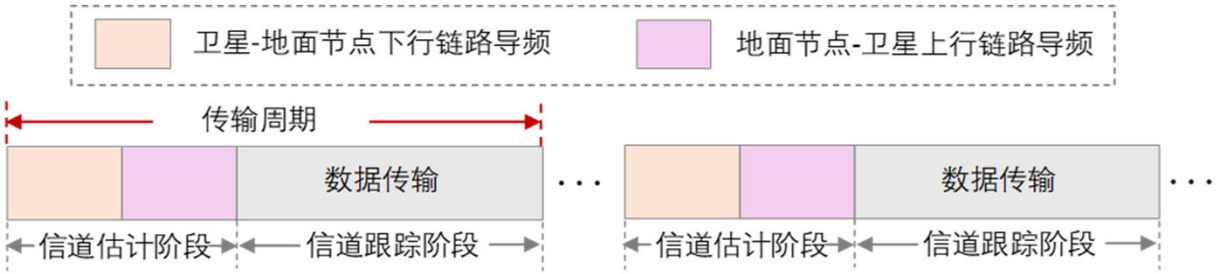
$$\theta_{\mathrm{X},i}^{a\star} = \arctan2(\vec{\mathbf{u}}_{\mathrm{X}}^{\mathrm{T}}\mathbf{e}_2, \vec{\mathbf{u}}_{\mathrm{X}}^{\mathrm{T}}\mathbf{e}_1),$$
$$\theta_{\mathrm{X},i}^{z\star} = \min\{\arccos(\vec{\mathbf{u}}_{\mathrm{X}}^{\mathrm{T}}\mathbf{e}_3), \theta_{\max}\}$$





◆ T. Ma, B. Zheng, C. You, R. Liu, and R. Schober, "Rotatable antenna-enabled satellite communication: joint design of boresight alignment and beam tracking," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 15, pp. 5651-5655, 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11701269

□ 低轨卫星通信系统的信道估计与数据传输协议



信道估计与数据传输协议

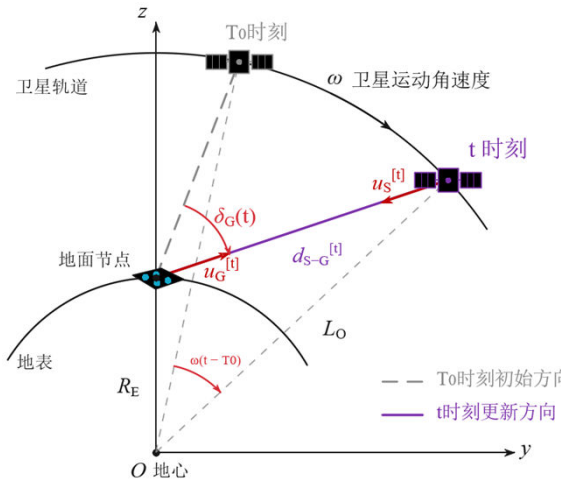
- **下行训练**：卫星发送导频，地面节点根据接收信号构建样本协方差矩阵，采用MUSIC算法估计本地入射角，随后利用闭式解更新阵元指向与接收波束
- **上行训练**：同下行训练过程

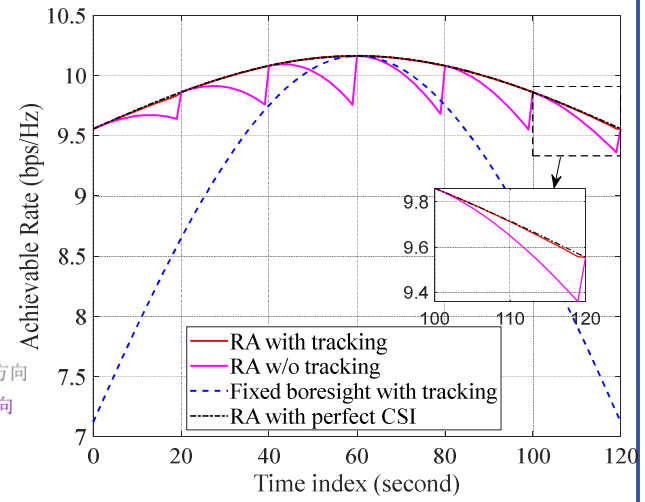
接收信号协方差矩阵 $\mathbf{R} = \mathbb{E}\{\mathbf{y}_\mathrm{G}\mathbf{y}_\mathrm{G}^\mathrm{H}\} = \frac{1}{L_\mathrm{D}}\sum_{l=1}^{L_\mathrm{D}} \mathbf{y}_\mathrm{G}^{(l)}(\mathbf{y}_\mathrm{G}^{(l)})^\mathrm{H}$

MUSIC空间谱 $V(\vartheta,\varphi,\mathbf{F}_\mathrm{G}) = \frac{1}{\mathbf{b}_\mathrm{G}^\mathrm{H}(\mathbf{F}_\mathrm{G};\vartheta,\varphi)\mathbf{E}_n\mathbf{E}_n^\mathrm{H}\mathbf{b}_\mathrm{G}(\mathbf{F}_\mathrm{G};\vartheta,\varphi)}$

预测跟踪方案

- 利用**轨迹可预测性**，构建**线性**角度模型
- 两端**独立跟踪更新**，无需集中反馈



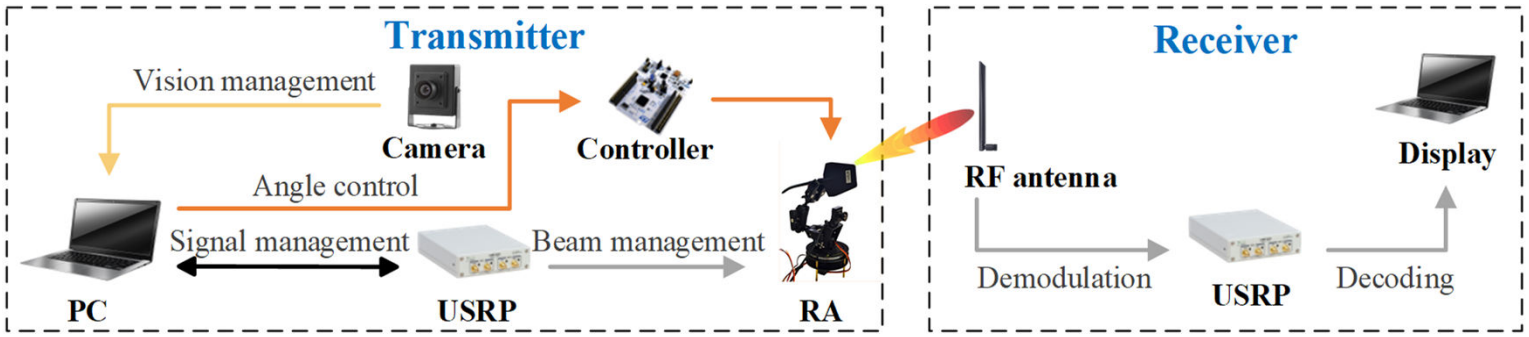


✓ 基于轨道预测的波束跟踪**有效抑制指向失配引起的速率下降**，在高动态场景下实现接近完美 CSI 基准的传输性能

◆ T. Ma, B. Zheng, C. You, R. Liu, and R. Schober, "Rotatable antenna-enabled satellite communication: joint design of boresight alignment and beam tracking," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 15, pp. 5651-5655, 2026. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11701269

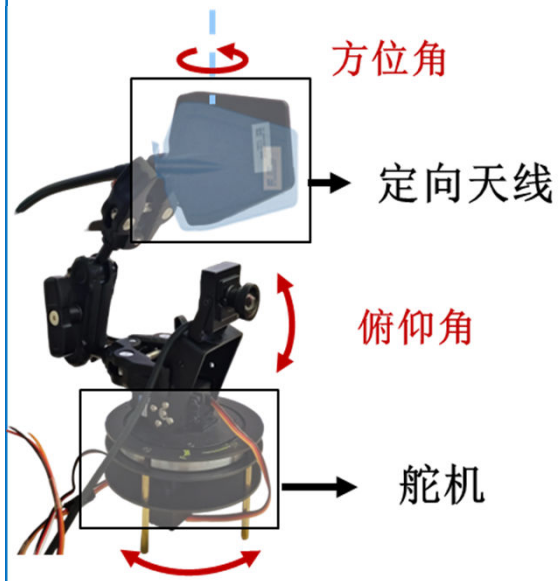
基于视觉识别的可转向单天线通信系统

系统架构



实测场景

可转向天线

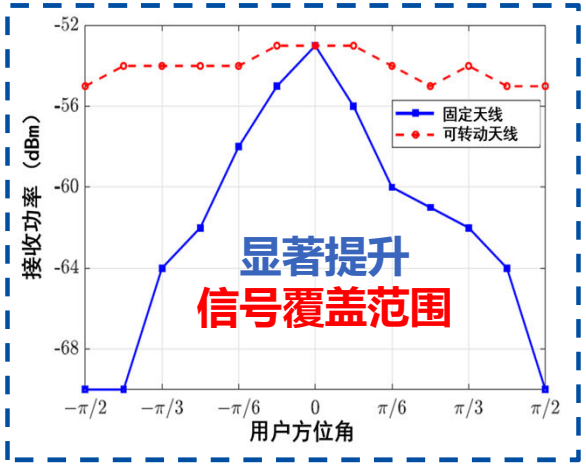


室内通信场景测试

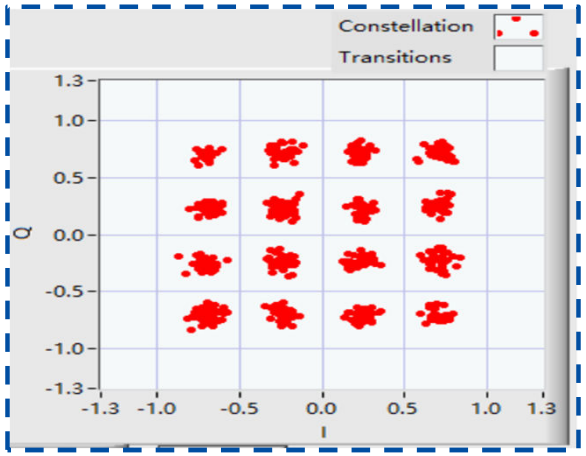


实验结果

◆ 接收端信号功率



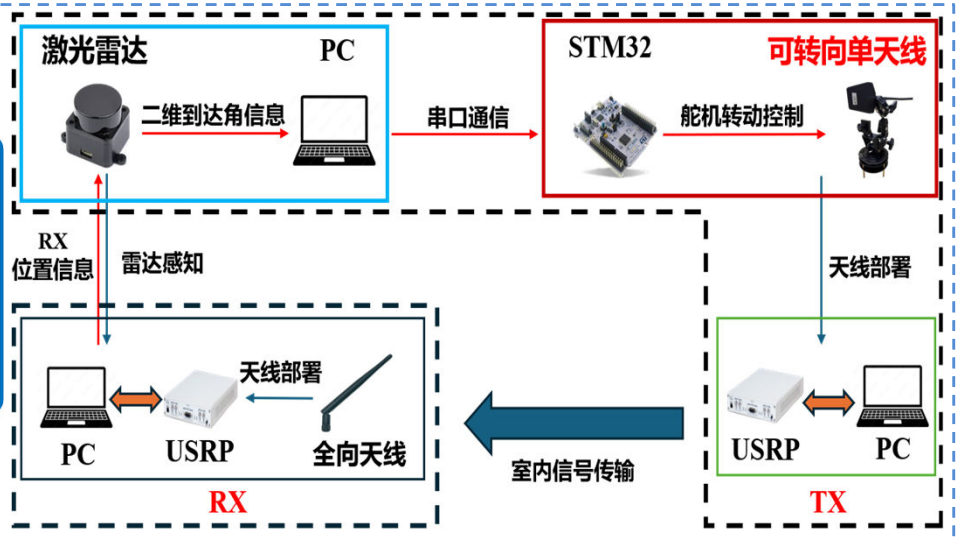
◆ 接收端星座图



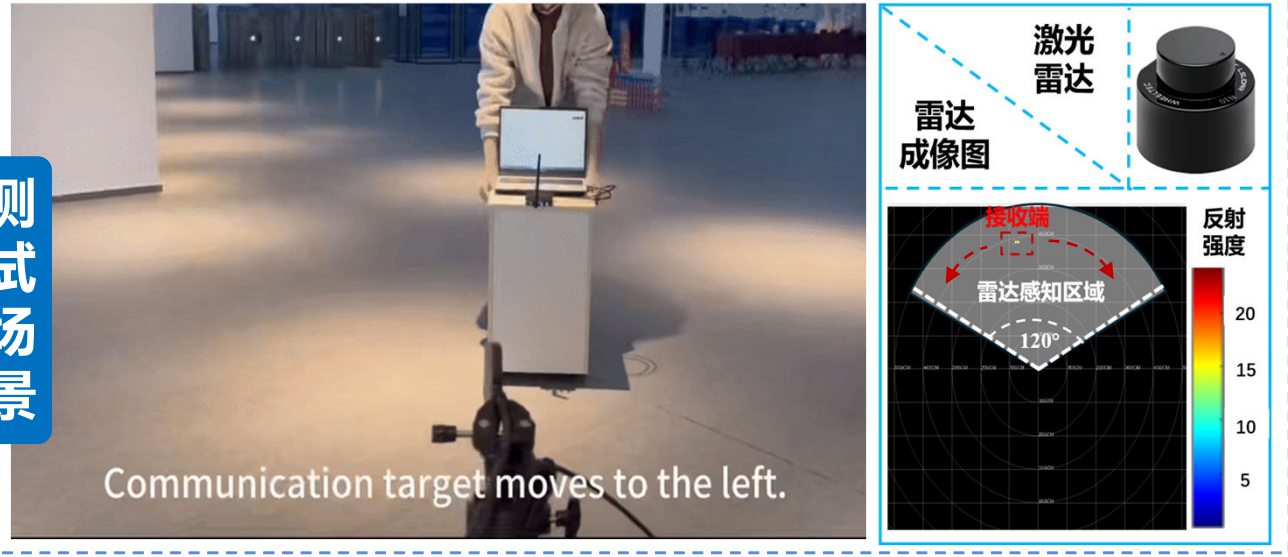
◆ L. Dai, B. Zheng. Y. Tan, L. Zhu, F. Chen, R. Zhang, “Rotatable antenna enabled wireless communication system with visual recognition: A prototype implementation, ” in *Proc. IEEE/CIC Int. Conf. Commun. China (ICCC)*, Shanghai, China, Aug. 2025, pp. 1–6. Available: https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.17097 （**IEEE/CIC ICCC最佳demo奖**）

基于雷达感知的可转向单天线通信系统

系统架构

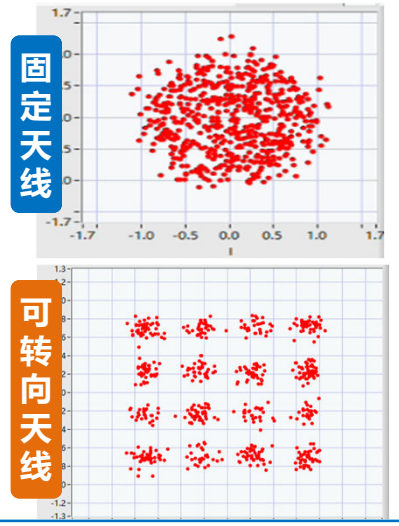


测试场景

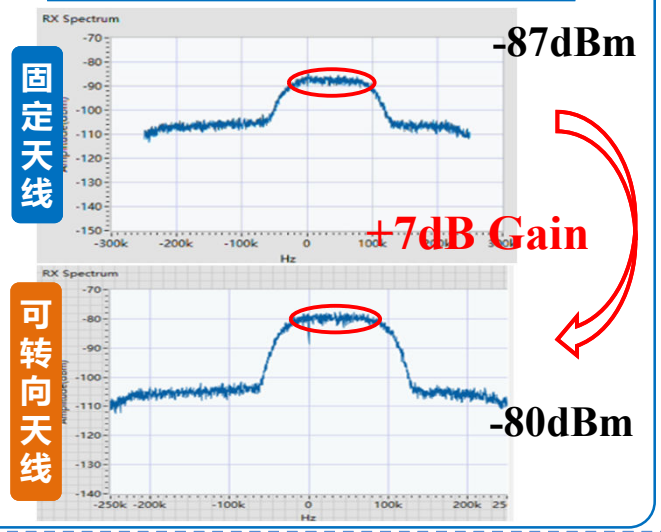


测试结果

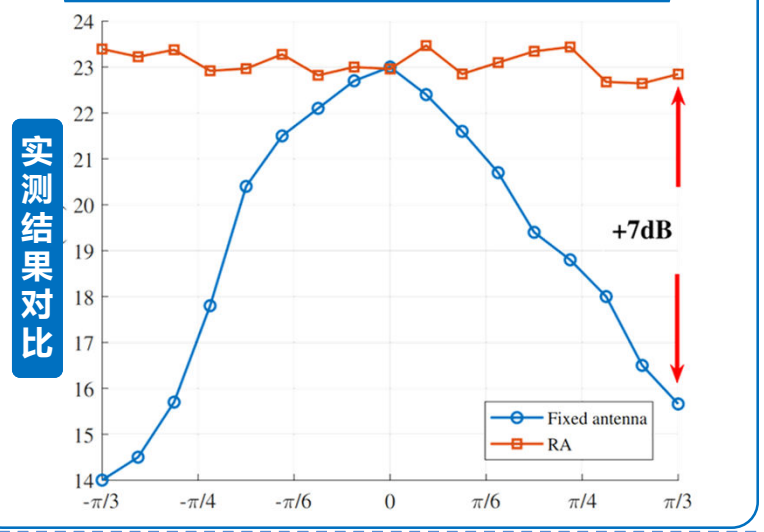
星座图



频谱图



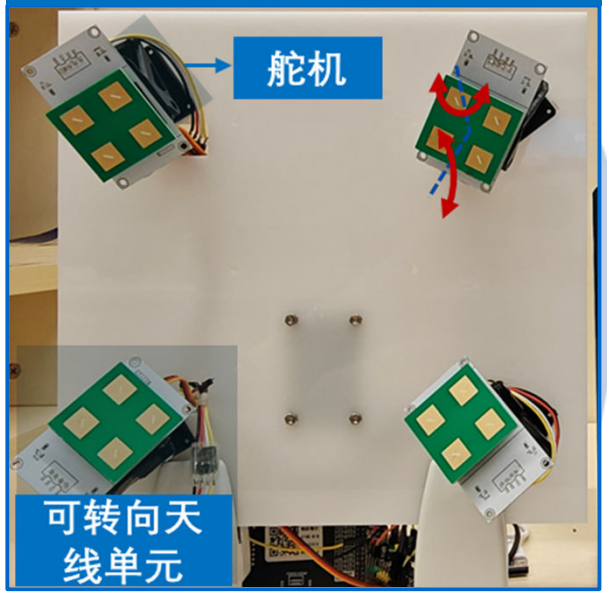
用户端接收信噪比



◆ Q. Dai, B. Zheng, Y. Tan, L. Yang, J. Tang, “Rotatable antenna-enabled integrated sensing and communication: a radar-aided prototype implementation,” in *Proc. IEEE/CIC Int. Conf. Commun. China (ICCC),* Wuhan, China, Aug., 2026, pp. 35-36. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11680271

可转向天线阵列赋能低空通感系统

可转向天线阵列(2×2)



基站侧可转向天线与无人机通信（模拟场景）



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 ICCC
最佳演示奖



2025年IEEE SPCC竞赛
亚军

◆ L. Dai, B. Zheng. Y. Tan, L. Zhu, F. Chen, R. Zhang, “Rotatable antenna enabled wireless communication system with visual recognition: A prototype implementation, ” in *Proc. IEEE/CIC Int. Conf. Commun. China (ICCC)*, Shanghai, China, Aug. 2025, pp. 1–6. Available: https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.17097 （**IEEE/CIC ICCC最佳demo奖**）


可转向天线（RA）原型机展示
Rotatable Antenna Prototype Demo
郑倍雄课题组 @ 华南理工大学-空间感知与智能物联团队

TP-link Archer AXE200 Omni

机械转向



https://www.tp-link.com/sg/home-networking/wifi-router/archer-axe200-omni/

HUAWEI AirEngine 5760-51

电子转向



https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/Smart+Antenna.html

◆ B. Zheng, Q. Wu, X. Xiong, Y. Tan, T. Ma, Q. Dai, W. Zhu, et al., "Rotatable antenna-empowered wireless networks: A tutorial," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, Nov. 2026. Available: https://arxiv.org/pdf/2603.25559

华南理工大学

South China University of Technology

谢谢聆听

恳请批评指正！

郑倍雄

华南理工大学

E-mail: bxzheng@scut.edu.cn

