



# 面向通感一体化系统的覆盖增强 与干扰抑制技术研究

答辩人：余致远

学号：230825 导师：任红 副教授

# 目录

1

研究背景

2

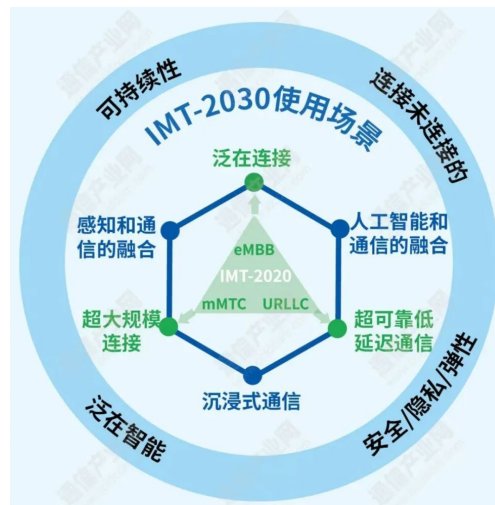
研究思路

3

研究内容

## 通感一体化

2023年3月，全球6G技术大会，通感一体将是6G的标志特征  
2023年6月，国际电信联盟，感知与通信融合被列入新兴场景



(数据来源: IMT 2030推进组)

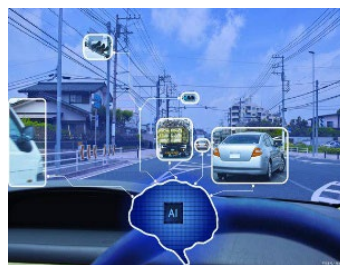
通感一体化

通感融合  
新兴应用

### 沉浸式体验



### 无人化



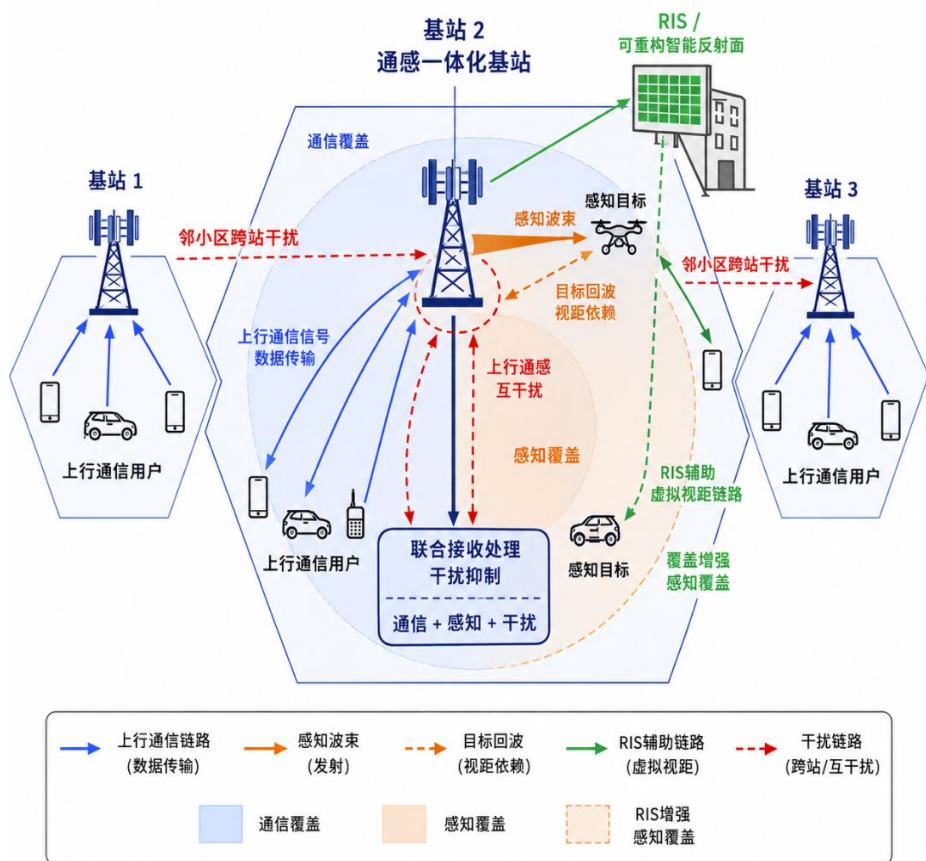
### 人机交互



### 精准医疗



## 关键问题



### 1. 高频大带宽通感网络覆盖范围受限

➤ 高速率，高距离精度的大带宽需求导致高频通感网覆盖范围受限

### 2. 低空典型场景上行通信与感知需求具增

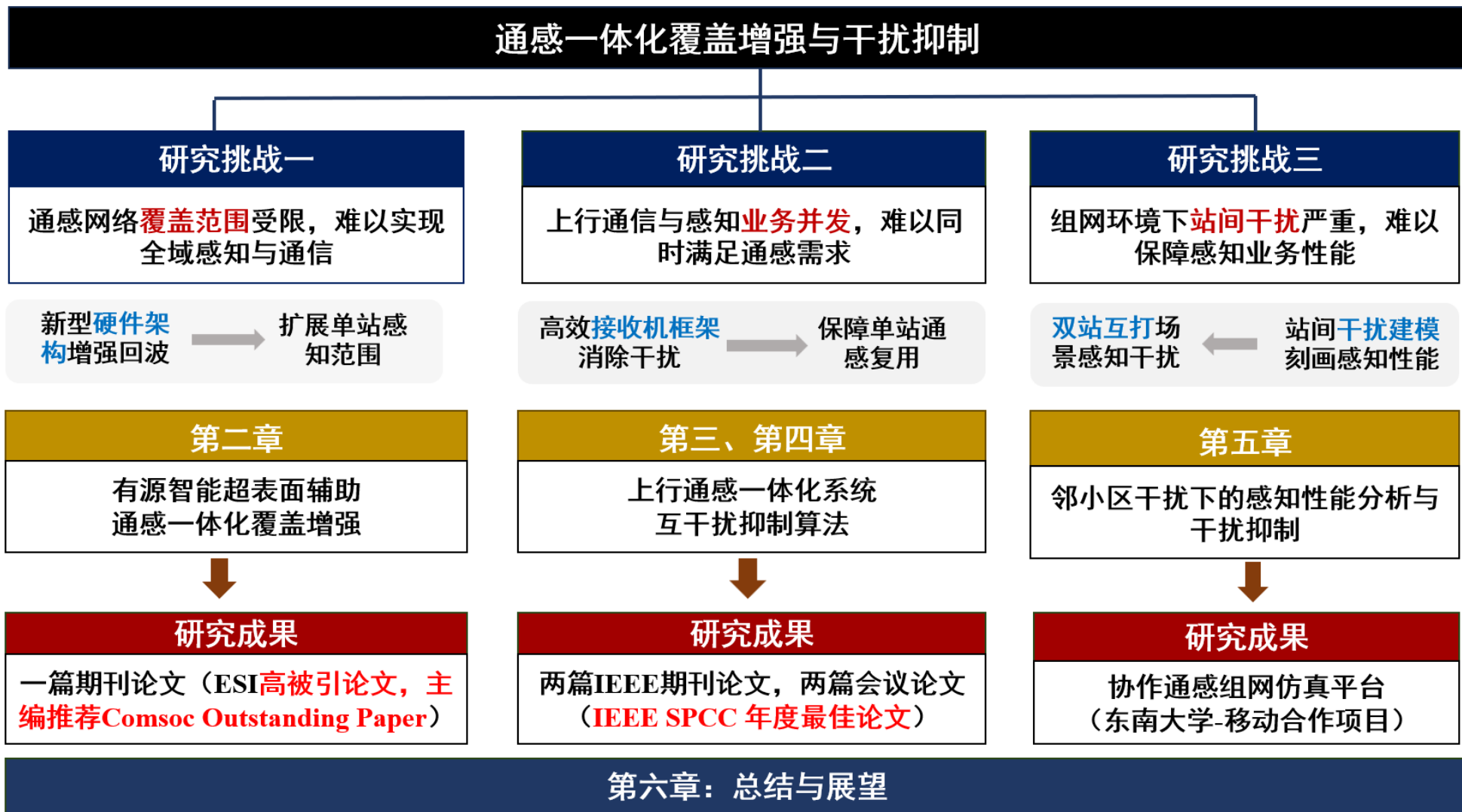
➤ 无人机业务上行传输需求大，基站视角下的监管难度高

### 3. 通感组网环境下邻区干扰不可忽略

➤ 组网环境下，邻站干扰对感知业务的影响和规避机制尚未探明



## 面向通感一体化系统的覆盖增强与干扰抑制技术研究



# 目录

1

研究背景

2

研究内容

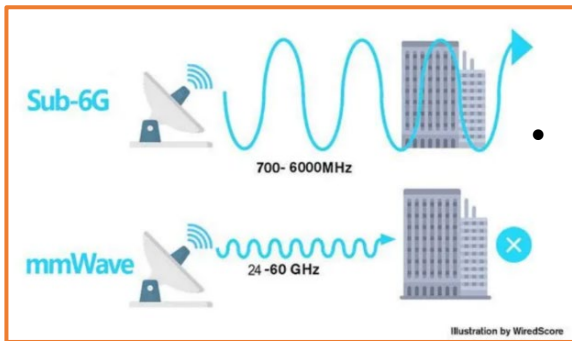
3

研究成果

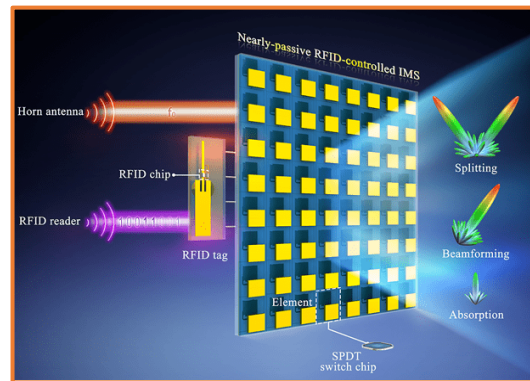


## 1 研究背景

RIS 辅助通感

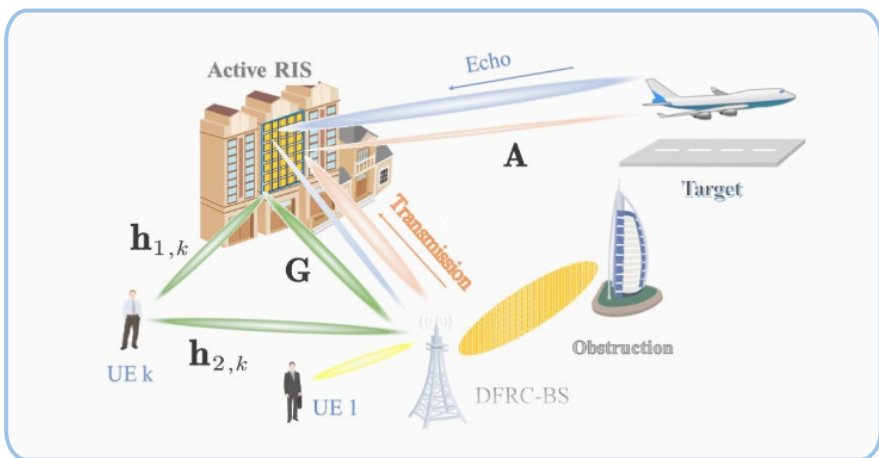


通感信号频段高，信号更容易被遮挡，网络存在大量盲区

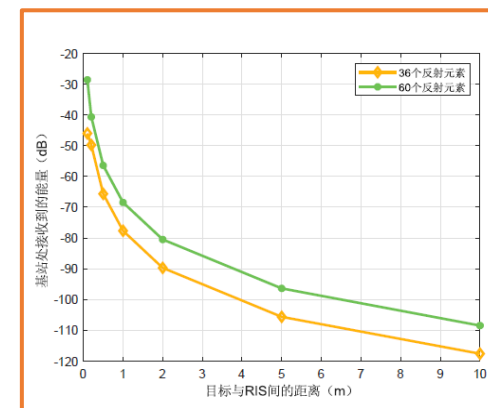


智能超表面 (RIS) 可用来建立虚拟链路，提升通感网络覆盖能力

研究缺陷

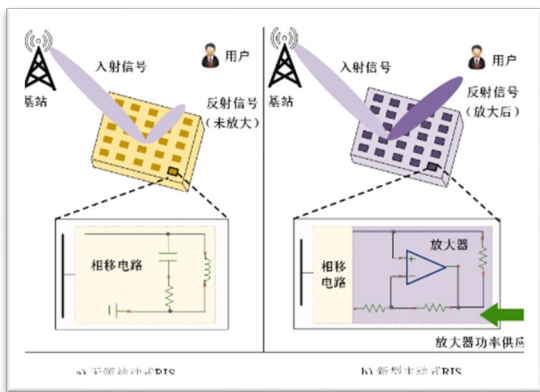
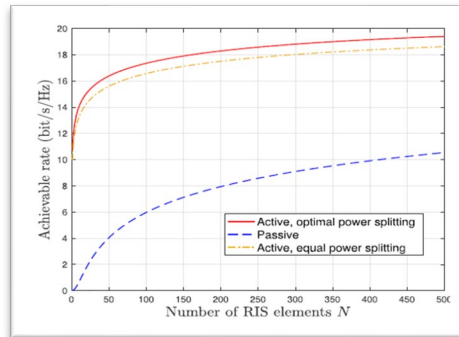
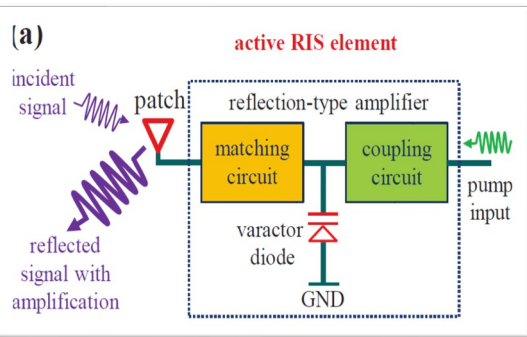


- 信号会在RIS和感知目标上共发生四跳反射
- 反射过程中，等效信道路损为多段路损的乘积而非总和。
- 这会导致回波能量非常微弱



## 2 系统模型

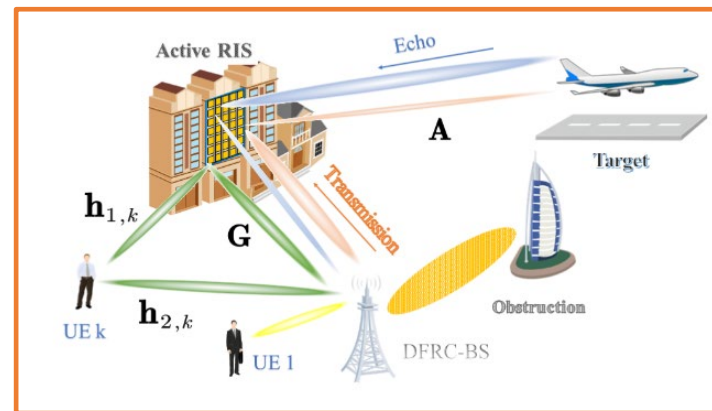
### □ 解决方案：有源RIS



■ 在同样的功率预算下，通信性能远优于传统无源RIS

■ 在有源RIS辅助ISAC系统中，信号可以被放大两次，对抗乘性衰落

### □ 系统建模



- ✓ 放大器的热噪声
- ✓ 放大器的放大增益限制
- ✓ 有源RIS的功率约束
- ✓ 回波信噪比

### ➤ 研究问题

□ 传输方案：信号在同一块RIS板上反射两次，传统RIS辅助通信的相位设计理念不再适用。

□ 性能分析：有源RIS引入的热噪声，放大增益限制以及功率约束会给系统设计带来怎样的影响？

## 3

## 算法设计

## 研究难点：如何优化四次矩阵函数

以最大化信噪比表达式为例

$$\text{Tr}(\mathbf{J}_i^{-1} \mathbf{B}_i \mathbf{R} \mathbf{B}_i^H \mathbf{J}_i^{-1} \mathbf{J}) = \text{Tr}(\mathbf{T}_i \mathbf{J})$$

$$= \sigma^2 \text{Tr}(\mathbf{T}_i \mathbf{G}^H \mathbf{U}^H \mathbf{A} \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{A}^H \mathbf{U} \mathbf{G}) + 2\sigma^2 \text{Re}(\text{Tr}(\mathbf{T}_i \mathbf{G}^H \mathbf{U} \mathbf{U}^H \mathbf{A} \mathbf{U} \mathbf{G})) + a$$

四次项

三次项

其他项

## 希尔伯特第十七问题

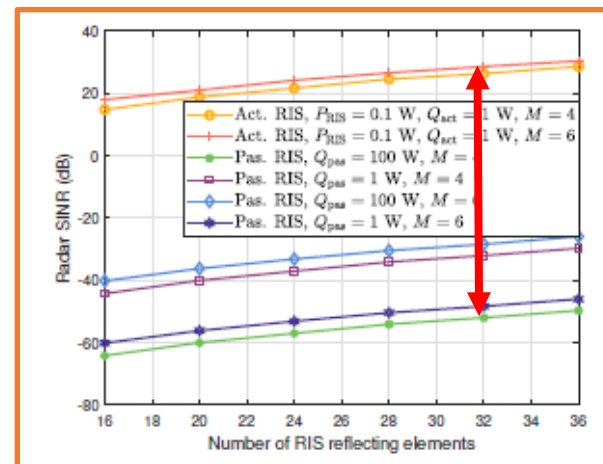
✓ 希尔伯特在第二届国际数学家大会提出了希尔伯特二十三问题。

✓ 第十七问题：给定一个多维多项式，在实数域上非负，是否可以写成有限个多项式的平方和？



## 破局之道

当优化问题可以写成平方和 (Sum of Square, SOS) 的形式时，可通过类SDP算法求解



性能相比传统无源RIS辅助ISAC可提升60dB

此外，通过简化性能分析得到了有源RIS Scaling order和功率分配，位置部署的一般性规律。



## 4 研究成果

论文相关成果

Popular Recent Most Cited ⓘ

**Active RIS-Aided ISAC Systems: Beamforming Design And Performance Analysis**  
Zhiyuan Yu; Hong Ren; Cunhua Pan; Gui Zhou; Boshi Wang; Mianxiong Dong; Jiangzhou Wang

**Waveform Design For MIMO-OFDM Integrated Sensing And Communication System: An Information Theoretical Approach**  
Zhiqing Wei; Jinghui Piao; Xin Yuan; Huici Wu; J. Andrew Zhang; Zhiyong Feng; Lin Wang; Ping Zhang

**A Unified Multi-Task Semantic Communication System For Multimodal Data**  
Guangyi Zhang; Qiuyu Hu; Zhijin Qin; Yunlong Cai; Guanding Yu; Xiaoming Tao

**Near-Field Sparse Channel Representation And Estimation In 6G Wireless Communications**  
Xing Zhang; Haiyang Zhang; Yonina C. Eldar

**On-Board Federated Learning For Satellite Clusters With Inter-Satellite Links**  
Nasrin Razmi; Bho Matthiesen; Armin Dekorsy; Petar Popovski

### Active RIS-Aided ISAC Systems: Beamforming Design and Performance Analysis

Highly Cited Paper

By Yu, ZY (Yu, Zhiyuan)<sup>[1]</sup>; Ren, H (Ren, Hong)<sup>[1]</sup>; Pan, CH (Pan, Cunhua)<sup>[1]</sup>; Zhou, G (Zhou, Gui)<sup>[2]</sup>; Wang, BS (Wang, Boshi)<sup>[1]</sup>; Dong, MX (Dong, Mianxiong)<sup>[3]</sup>; Wang, JZ (Wang, Jiangzhou)<sup>[4]</sup>

View Web of Science ResearcherID and ORCID (provided by Clarivate)

Source IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS ▾



Zhiyuan Yu

Southeast University  
在 seu.edu.cn 的電子郵件地址已通過驗證

標題	引用次數
Active RIS-aided ISAC systems: Beamforming design and performance analysis	280
Z Yu, H Ren, C Pan, G Zhou, B Wang, M Dong, J Wang IEEE Transactions on Communications 72 (3), 1578-1595	

**Nomination for the IEEE Communications Society Outstanding Paper Award**

Admin IEEE TCOM 于 02月14日 03:20 发给 zyu, gui.zhou, h.ren, c.pan, boshi.wang, mx.dong, j.z.wang, EIC IEEE TCOM

Dear Authors,

Following the evaluation of the IEEE TCOM Best Paper Nomination Committee, which consists of the EIC and 3 Area Editors, the EIC (cc) intends to nominate your paper entitled "Active RIS-Aided ISAC Systems: Beamforming Design and Performance Analysis" for the IEEE Communications Society Outstanding Paper Award.

According to the nomination guidelines, a list of all ComSoc Paper Awards received by any of the authors of the nominated paper over the past five years is required. Please send this information by tomorrow, be replying to this email, as the deadline for paper award nominations is February 15.

Thank you very much.

Best regards,

Panos Diamantoulakis  
Editorial Assistant to Editor-in-Chief  
IEEE Transactions on Communications

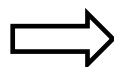
- 主编推荐IEEE Communications Society Outstanding Paper Award.
- 多次入选ESI高被引论文
- 连续一年阅读量居TCOM榜首

## 1 研究背景

### 低空经济发展图景



- ✓ 无人机视频、数据上传
- ✓ 环境感知与航空监视等



### 通感新需求



- ✓ 超大上行需求
- ✓ 无隙全域感知

上行通信与感知  
从竞争到复用

## 1 研究背景

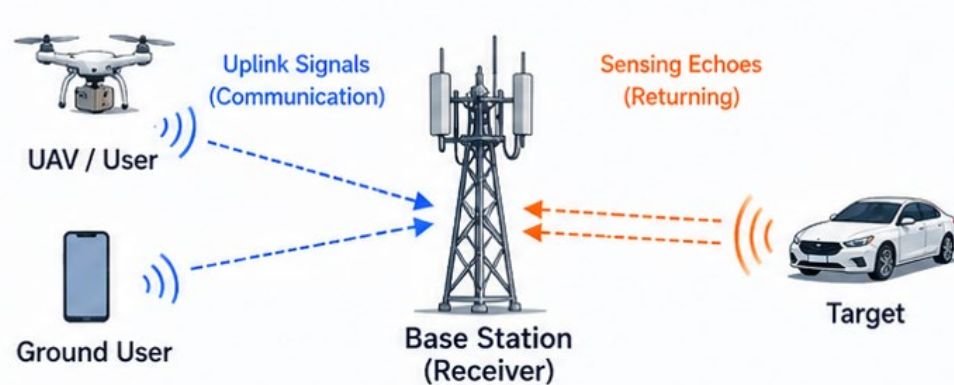
### 下行通感一体化



#### 关键问题

- ✓ 联合波形设计
- ✓ 通感性能折衷

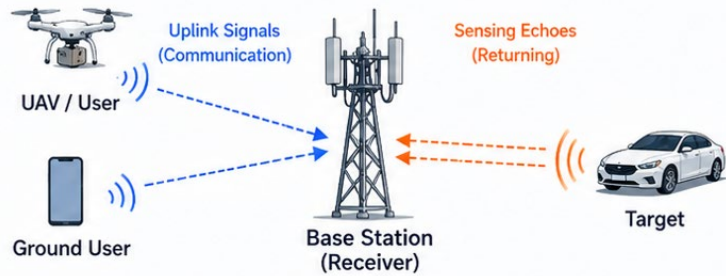
### 上行通感一体化



#### 关键问题

- ✓ 检测, 估计算法设计
- ✓ 通感信号互干扰

关键问题：如何解耦接收机收到的通感混合信号？



上行通感场景图

## 2 问题描述

考虑联合处理  $L$  个符号

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}_r \mathbf{X}_r + \mathbf{H}_c \mathbf{X}_c + \mathbf{N} \quad \text{—— 噪声}$$

目标响应矩阵:  $\mathbf{H}_r$  ① 未知

感知发射波形:  $\mathbf{X}_r = [\mathbf{x}_r[1], \dots, \mathbf{x}_r[L]]$  已知

上行通信信道:  $\mathbf{H}_c$  已知

用户发送符号:  $\mathbf{X}_c = [\mathbf{x}_c[1], \dots, \mathbf{x}_c[L]]$  未知

最大似然估计

$$\underset{\mathbf{H}_r, \mathbf{X}_c \in \mathcal{X}^{K \times L}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{H}_r \mathbf{X}_r - \mathbf{H}_c \mathbf{X}_c\|_F^2$$

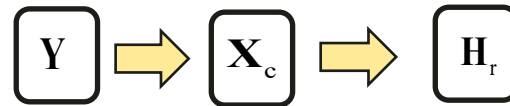
②  $\Downarrow$  向量化


$$\underset{\mathbf{h}_r, \mathbf{x}_c \in \mathcal{X}^{LK}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c - \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r\|_2^2$$

主要研究挑战

- ① 未知数异构导致的矩阵欠定: 矩阵方程  $\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{Y}\mathbf{B} = \mathbf{C}$  存在多组可行的  $\tilde{\mathbf{X}}, \tilde{\mathbf{Y}}$
- ② 混合整数最小二乘问题:  $\mathbf{H}_r$  连续,  $\mathbf{x}_c \in \mathcal{X}^{K \times L}$  离散

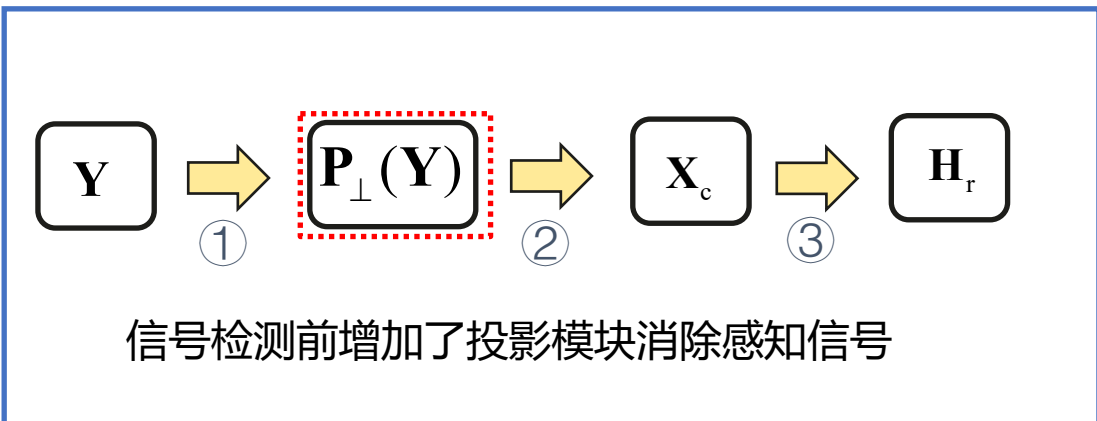
现有方案: SIC



- ① 把感知信号看作AWGN, 提取目标响应。
  - ② 在接收信号中将感知信号减去, 然后提取目标响应解调通信信号。
-  干扰成噪  
误差传播

## 3 投影接收机

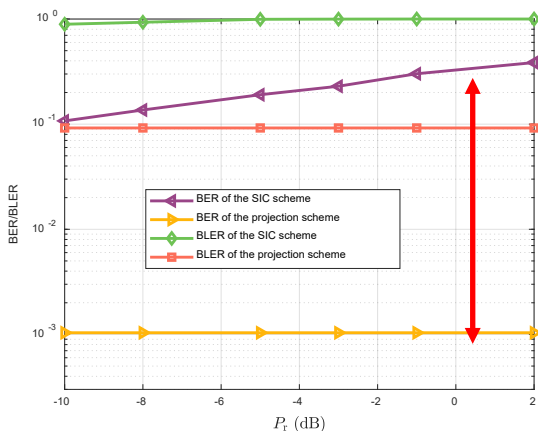
设计方法



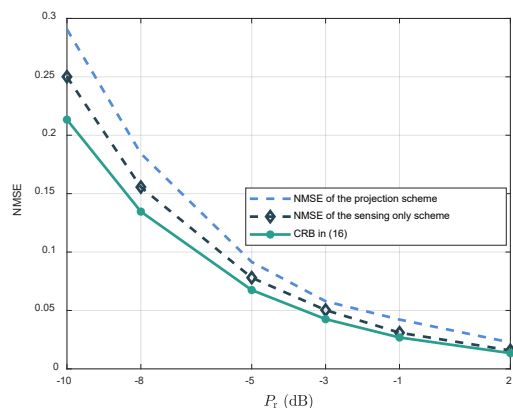
### ➤ 算法特点

- 理论证明为最大似然的等价形式
- 能够有效利用感知波形的结构
- 可实现与纯通信相同的信噪比

仿真结果



通信 (块) 误码率



感知TRM估计误差

- 有效消除感知干扰，误码率远低于SIC方法
- 通信符号检测准，连带感知信号检测准



投影接收机为解决通感互干扰提供了新思路



## 3

## 投影接收机

### ➤ 投影欠定性

$$\underset{\mathbf{x}_c \in \mathcal{X}^{LK}}{\operatorname{argmin}} \|\tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{G}\mathbf{x}_c\|_2^2 \quad \mathbf{G} = \mathbf{P}_\perp \otimes \mathbf{H}_c$$

观测矩阵欠定

正交投影矩阵  
 $\operatorname{Rank}(\mathbf{P}_\perp) = L - M_t$

$$\operatorname{Rank}(\mathbf{G}) = (L - M_t)K < LK$$

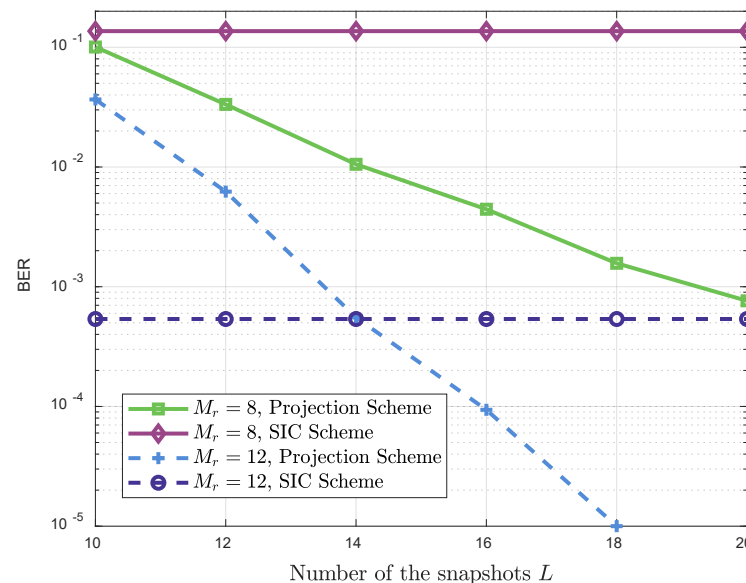
原因：原问题欠定（难点1），投影方案是原问题的等价形式



### ➤ 信号检测算法限制

- ✓ 线性检测算法，如ZF，AMP等，不再适用
- ✓ 非线性方法，如SDR，球形译码复杂度高  $\mathcal{O}(L^{3.5}N_t^{3.5})$

### ➤ 复杂度问题

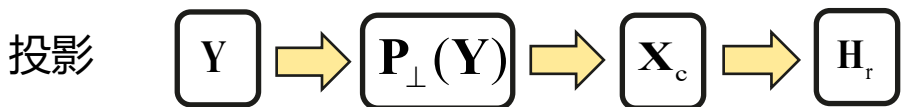
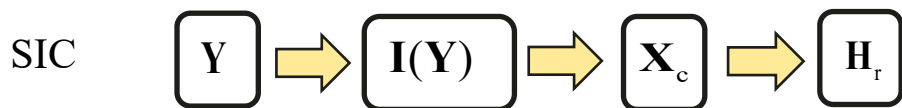


释放投影接收机的潜力需要联合处理多个快拍，带来更大的计算复杂度

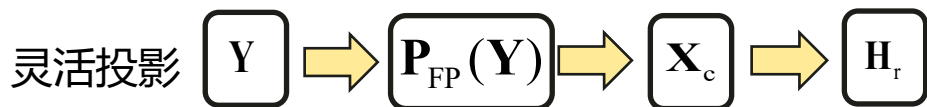
理论臻于完美，现实困于权衡

## 4 灵活投影接收机

### 一般性框架



$\rho \in [0, 1]$



$$P_{FP} = \rho I + (1 - \rho) P_{\perp}$$

$$= P_{\perp} + \rho P_{\parallel}$$

$\rho = 1 \quad P_{FP} = I \quad \text{SIC}$

$\rho = 0 \quad P_{FP} = P_{\perp} \quad \text{正交投影}$

灵活投影  
矩阵

信号空间  
投影矩阵

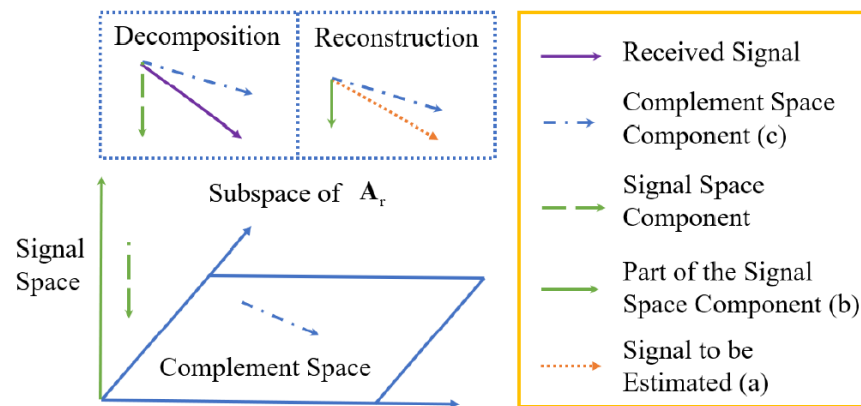
### 物理直觉

$$\hat{x}_c = \operatorname{argmin}_{x_c \in \mathcal{X}^{LK}} \| \Gamma_{FP}(y - A_c x_c - A_r h_r) \|^2$$

$$= \operatorname{argmin}_{x_c \in \mathcal{X}^{LK}} \| \Gamma(y - A_c x_c) + \rho \Gamma_{\parallel}(y - A_c x_c - A_r h_r) \|^2$$

正交空间分量

部分信号空间分量



非黑即白难最优，平衡之间见真章



## 4 灵活投影接收机

### ➤ 灵活投影接收机的SINR

$$\text{SINR}_{\text{FP}} \triangleq \frac{\mathbb{E}[\|\Gamma_{\text{FP}} \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c\|_2^2]}{\mathbb{E}[\|\Gamma_{\text{FP}} \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r\|_2^2] + \mathbb{E}[\|\Gamma_{\text{FP}} \mathbf{n}\|_2^2]}$$

$$= \frac{P_c(L - (1 - \rho^2)M_r)KM_r}{\rho^2 LP_s + (L - (1 - \rho^2)M_r)M_r K \sigma^2}$$

$\rho$  越小，信号空间分量越少，感知干扰越弱，信号检测的SINR越高

### ➤ 灵活投影接收机的条件数

$$\text{Cond}_{\text{PT}}(\mathbf{G}_T) \triangleq \frac{\omega_1(\mathbf{G}_{\text{FP}})}{\omega_{L_{N_r}}(\mathbf{G}_{\text{FP}})} = \sqrt{\frac{\lambda_1(\mathbf{G}_{\text{FP}}^H \mathbf{G}_{\text{FP}})}{\lambda_{L_{N_r}}(\mathbf{G}_{\text{FP}}^H \mathbf{G}_{\text{FP}})}}$$

$$= \frac{\lambda_1(\mathbf{P}_{\text{FP}})}{\lambda_L(\mathbf{P}_{\text{FP}})} \text{Cond}(\mathbf{H}_c) = \frac{1}{\rho} \text{Cond}(\mathbf{H}_c)$$

$\rho$  越大，信号空间分量越多，观测矩阵列相关性越强，欠定影响越小

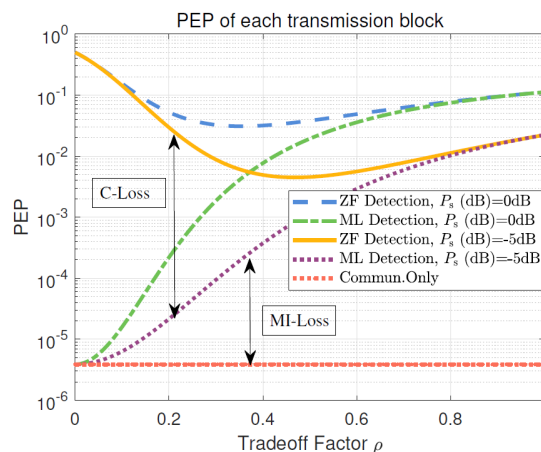


性能折衷

成对差错概率

- 成对差错概率是对误码率的高信噪比近似
- 假设通信过程满足有利传播

$$\mathbf{H}_c^H \mathbf{H}_c \approx \mathbf{I}$$



- ML 检测器能求解复杂问题，适合小的  $\rho$
- 而 ZF 检测器需要更大的  $\rho$  以获得数值稳定的解



$\rho$  的选取需与信号检测器设计联合考虑

## 5 动态投影接收机

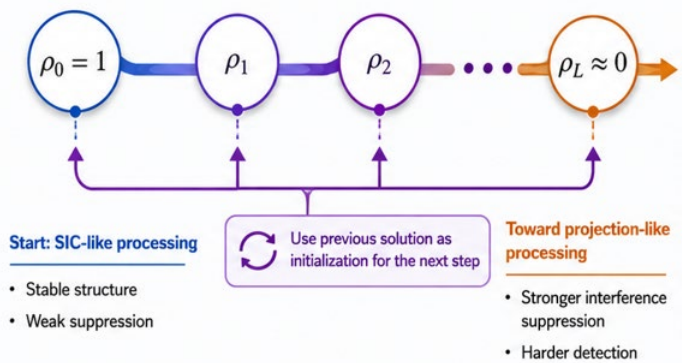
### 理论启发：同伦优化

构造一族同伦函数：
$$h(\mathbf{z}, \eta) = \begin{cases} f(\mathbf{z}), & \text{if } \eta = 0 \text{ and} \\ \dots \\ f^1(\mathbf{z}), & \text{if } \eta = 1, \end{cases}$$

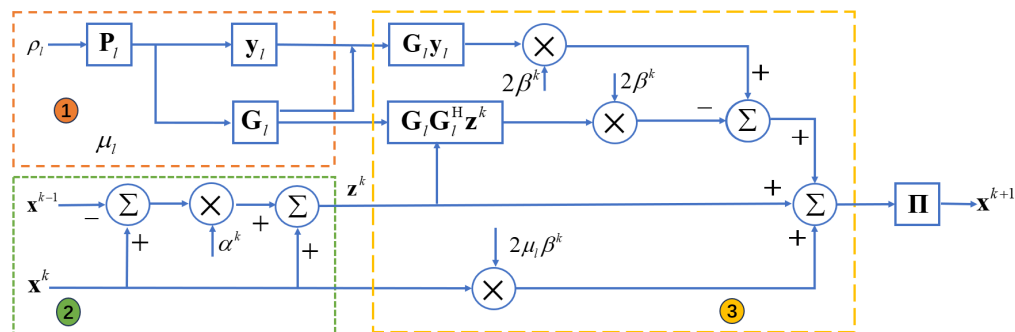
原问题  
↑ 简单的问题

用一系列子问题逼近待求解问题：先求解简单的子问题，在梯度下降的过程中，不断调整子问题，最终让子问题逼近原问题。

### 动态投影



### 接收机实现方法



✓ 外层迭代：更新折中因子  $\rho$  和惩罚因子  $\mu$  ①

✓ 内层迭代：外推点更新下的梯度下降方法 ② ③

仅需要矩阵乘法

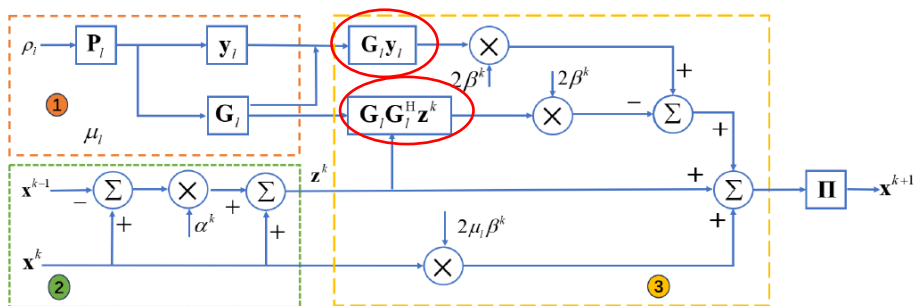
简单开始，慢慢变好



## 5 动态投影接收机

### ➤ 复杂度代价

动态投影接收机中每次使用不同的等效矩阵计算梯度



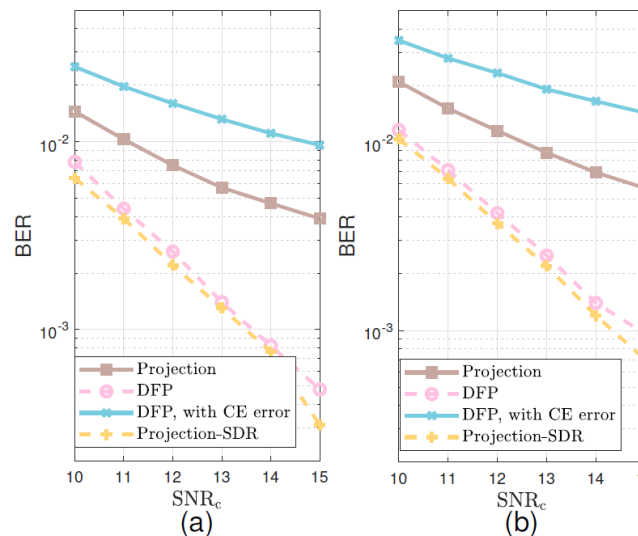
### ➤ 矩阵预计算

$$\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l = (1 - \rho_l)^2 \mathbf{M}_1 + \rho_l (1 - \rho_l) \mathbf{M}_2 + \rho_l^2 \mathbf{M}_3,$$

$$\mathbf{G}_l^T \mathbf{y}_l = (1 - \rho_l)^2 \mathbf{u}_1 + \rho_l (1 - \rho_l) \mathbf{u}_2 + \rho_l^2 \mathbf{u}_3,$$

矩阵乘法变加法，动态投影接收机实现与投影接收机相同的计算复杂度

### ➤ 误码率性能逼近SDR-投影接收机



### ➤ 计算时间相比SDR-投影接收机降低100倍

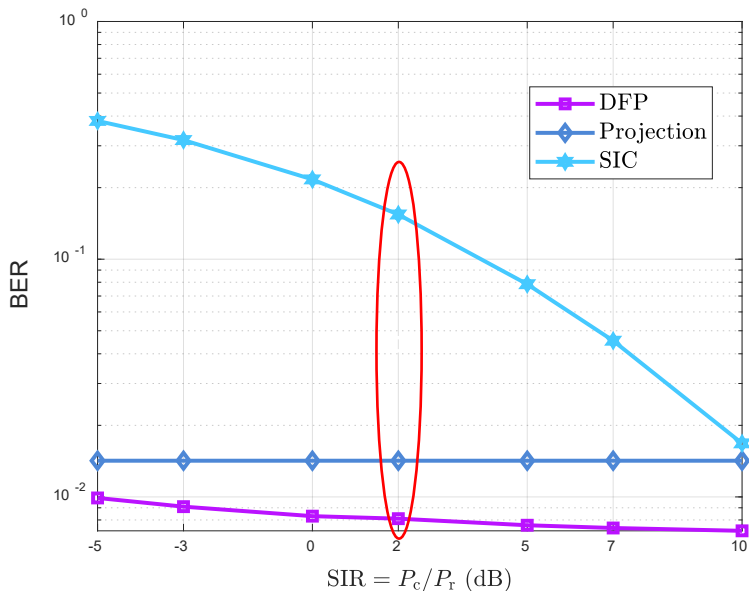
$(M_r, K, L)$	DFP receiver	SIC receiver	Projection-SDR
(8, 8, 16)	0.0018	$5.8 \times 10^{-4}$	0.55
(16, 16, 16)	0.0166	0.0025	2.52
(16, 16, 24)	0.0411	0.0025	Memory Limited



## 6

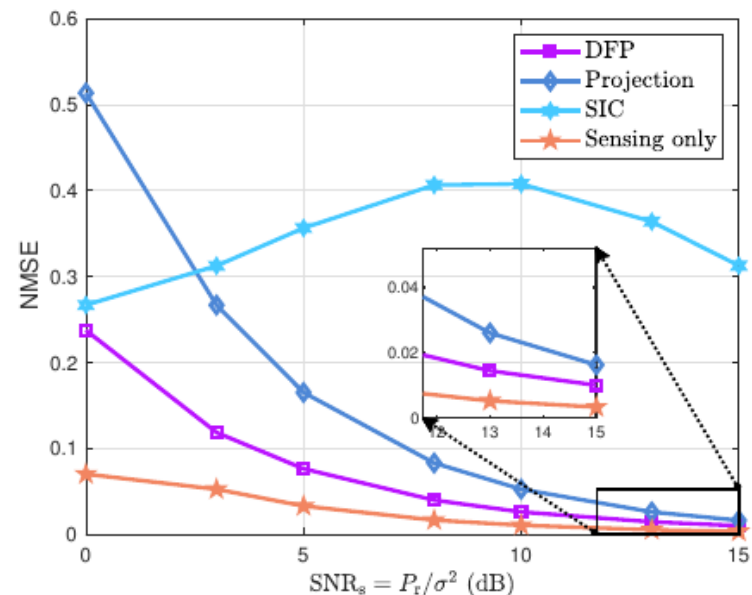
## 仿真结果

### ➤ 信号检测的误码率性能



动态投影性能比投影接收机更好，并且比SIC类有低得多的误码率

### ➤ 感知响应估计误差



动态投影相比基线，估计NMSE更低，并且在高信噪比下接近纯感知性能



## 6 仿真结果

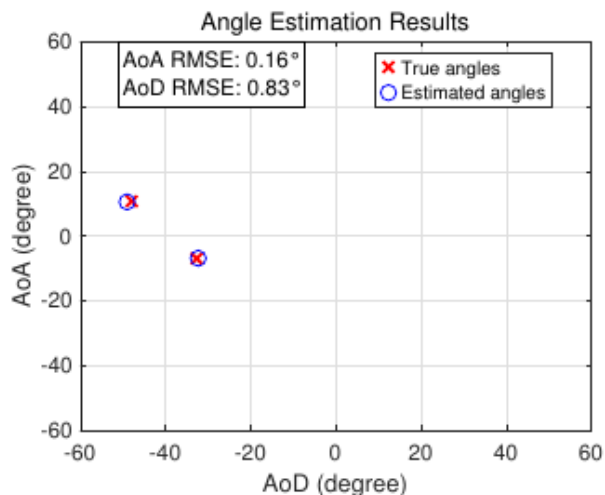


Fig. 9 (a): Sensing only,  $M_t = N_r = K = 8$

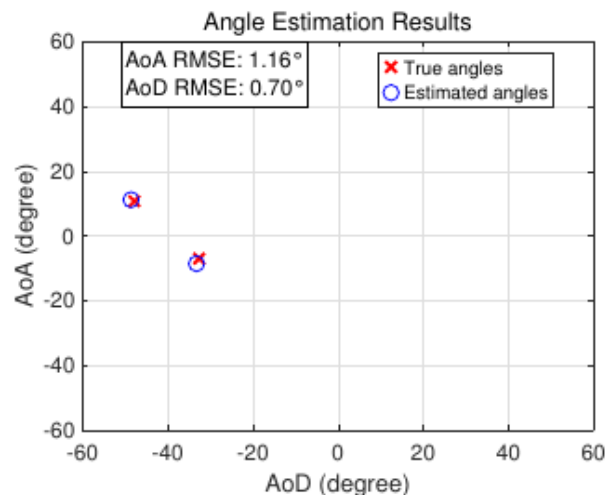


Fig. 9 (b): DFP,  $M_t = N_r = K = 8$

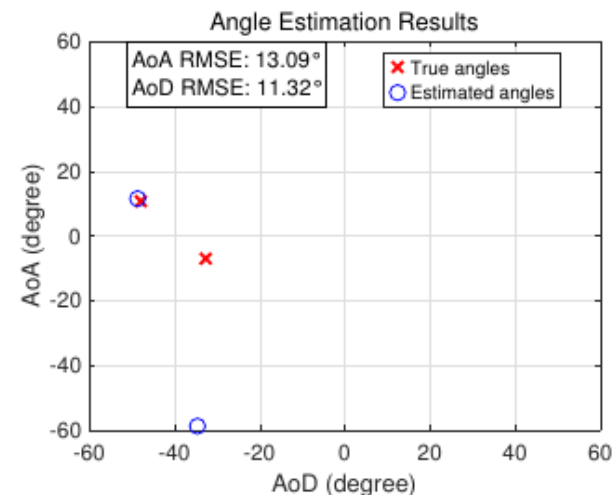


Fig. 9 (c): SIC,  $M_t = N_r = K = 8$

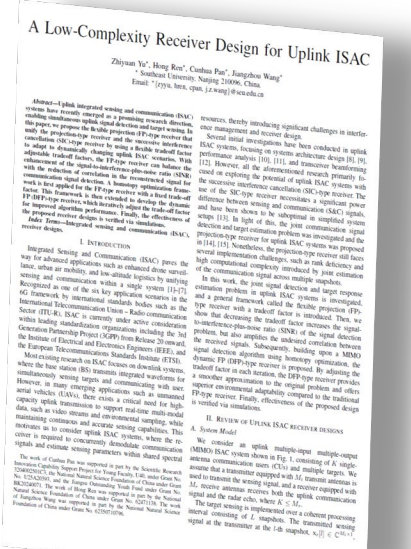
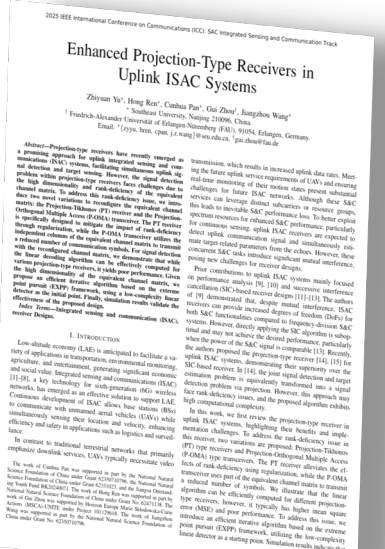
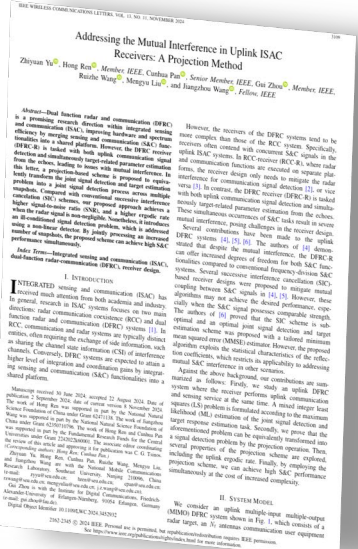
	DFP-type	SIC-type	Sensing-only
RMSE	5.6°	8.2°	2.2°
Hit rate	71.3%	50.9%	90.2%

➤ 相比于SIC类接收机, 动态投影接收机的角度估计误差降低超过**40%**, 估计成功率提升**20%**

# 研究内容二：上行通感互干扰抑制算法

## 7 研究成果

论文相关成果



IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY  
Signal Processing and Computing for Communications  
Technical Committee  
**2025 BEST PAPER AWARD**  
PRESENTED TO  
**Zhiyuan Yu, Hong Ren, Cunhua Pan, Gui Zhou, and Jiangzhou Wang**  
FOR THE FOLLOWING PAPER:  
**Enhanced Projection-Type Receivers in Uplink ISAC Systems**  
IEEE ICC 2025

Robert Soliman  
Robert Soliman, President, IEEE Communications Society

Wen Zhang  
Wen Zhang, U.S. Technical and Regional Activities, IEEE Communications Society

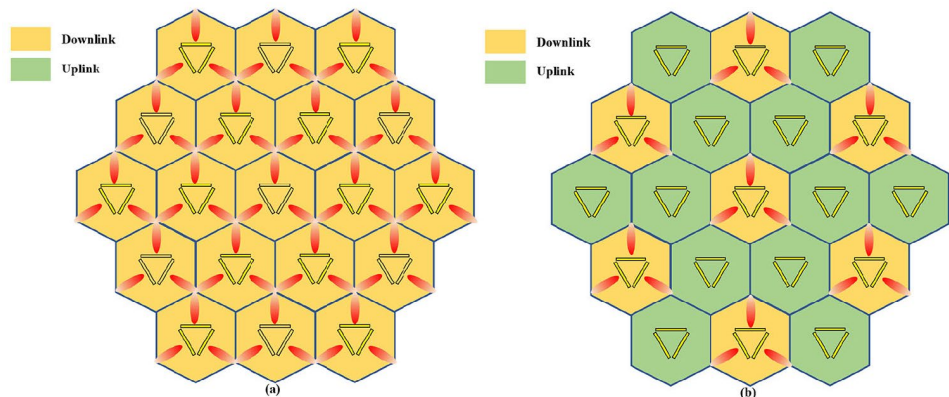
- 累计发表两篇期刊论文(TWC, WCL), 两篇ICC会议论文
- 获得IEEE SPCC (通信信号处理) 年度最佳论文
- 参与华为-东南大学联合实验室项目



## 1

## 研究背景

### 典型感知模式



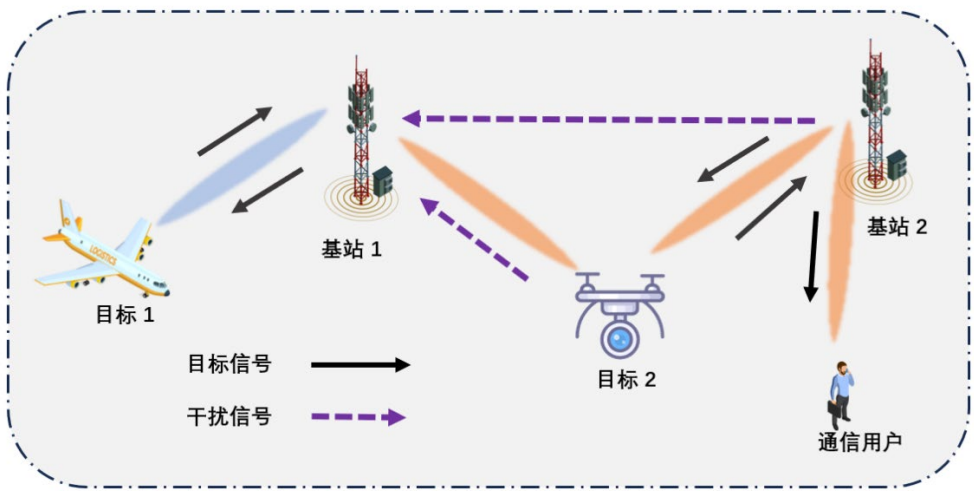
单站感知 (A发A收)

多站感知 (A发B收)

A发A收场景下，所有基站同时工作在下行工作模式，导致邻小区干扰不可忽略



### 研究场景



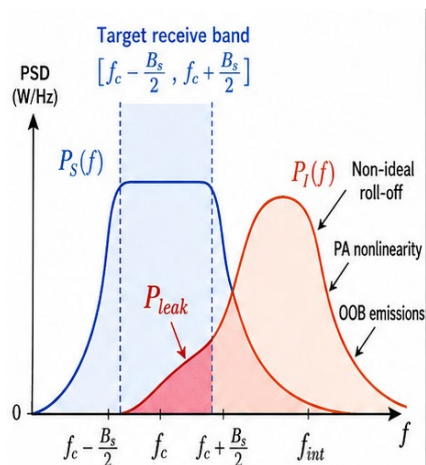
邻小区干扰对通信业务的影响已有较充分的研究，但对于感知业务的影响尚不明确



## 2

## 干扰建模

### 邻频干扰模型



- Target signal:  $P_S(f)$
- Interference:  $P_I(f)$
- Leaked interference in RX band:  $P_{leak}$

硬件非完美带来的邻频干扰

干扰信号

$$y(t) = s(t) + \eta \cdot i(t)$$



$$ACLR = \frac{\int_{f_c - B_s/2}^{f_c + B_s/2} P_I(f) |H_{RX}(f)|^2 df}{\int_{f_{int} - B_{int}/2}^{f_{int} + B_{int}/2} P_I(f) df}$$

$\eta = 0$  无干扰

$\eta = 1$  同频传输

### 多阶段性能评估

波束扫描

感知目标参数估计

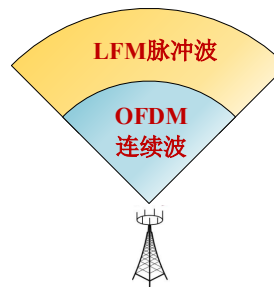
波束对准  
角度1

波束对准  
角度2

.....

波束对准  
角度N

### 多波形性能评估



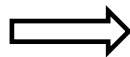
LFM, OFDM波形服务对象、占用资源均有差异，需分别比较邻小区干扰的影响

## 3 干扰规避

## 收端干扰抑制

- 基于统计信道状态信息的投影干扰消除技术

$$\mathbf{F}_{RF} = \mathbf{F}_{BB} \mathbf{H}_{I,LoS} (\mathbf{H}_{I,LoS}^H \mathbf{F}_{BB}^H \mathbf{F}_{BB} \mathbf{H}_{I,LoS})^{-1} \mathbf{H}_{I,LoS}^H \mathbf{F}_{BB}^H$$



$\mathbf{F}_{BB}$ : 模拟预编码矩阵     $\mathbf{H}_{I,LoS}$ : 干扰信道LoS分量  
 $\mathbf{F}_{RF}$ : 所设计的数字预编码 (或部分) 数字预编码

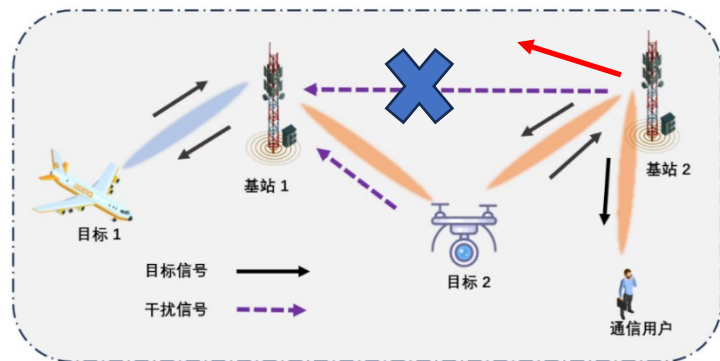
- 算法创新

可实现性: 小区间链路LoS径占主导, 且获取LoS信道较为容易。

可扩展性: 不改变信号处理框架, 可以继续采用超分辨算法。

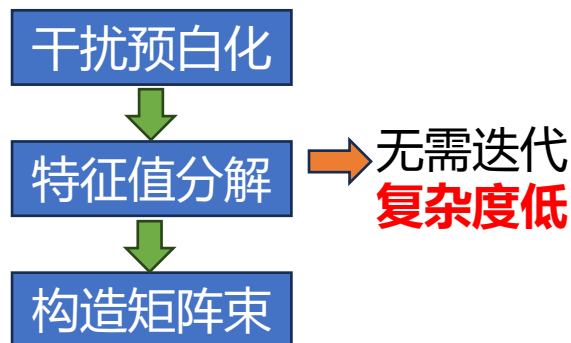
## 发端干扰抑制

- 双站协同场景下的低复杂度发射端干扰消除技术



造成干扰的基站在空域主动规避, 减小打到用于感知基站上的能量

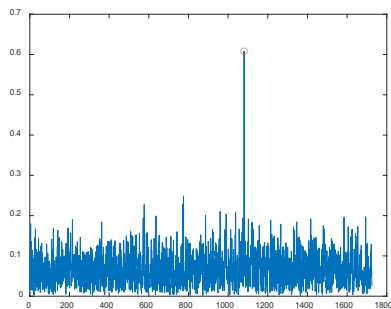
- 算法流程



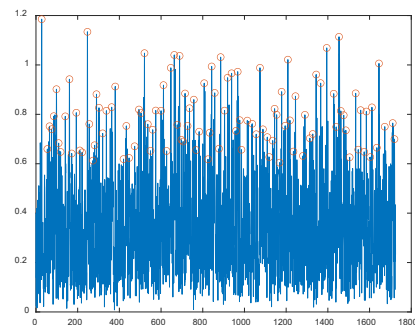
## 4 仿真结果

### ➤ 距离维感知结果

无干扰



有干扰



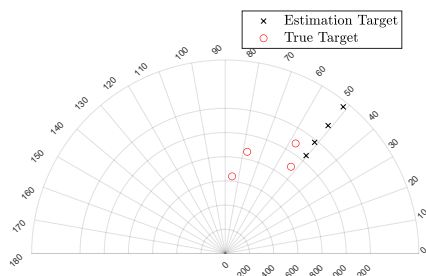
### ➤ 波束扫描结果

- ✓ 真实波束编号: 20 21 127 139 140 141 (共6个)
- ✓  $\eta = -40\text{dB}$ , 不进行干扰抑制:  
20 21 53 66 79 80 92 105 127 139 141 (共11个)
- ✓  $\eta = -40\text{dB}$ , 接收端干扰抑制:  
7 8 20 21 127 139 140 141 (共8个, 效率提升20%)

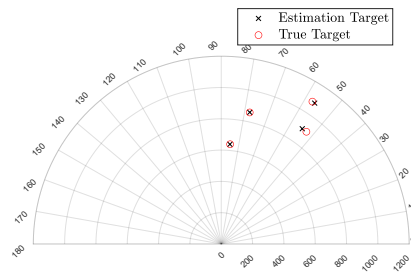
波束扫描失准

### ➤ LFM估计结果

$\eta = -10\text{dB}$



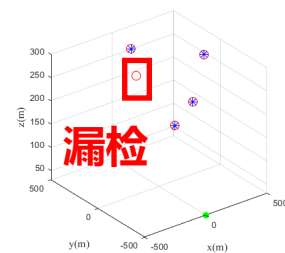
不做干扰抑制



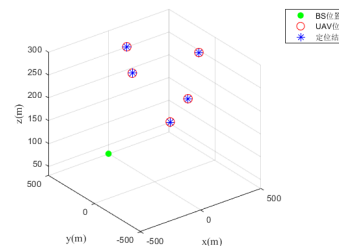
接收端干扰抑制

### ➤ OFDM估计结果

$\eta = -10\text{dB}$



不做干扰抑制



发射端干扰抑制

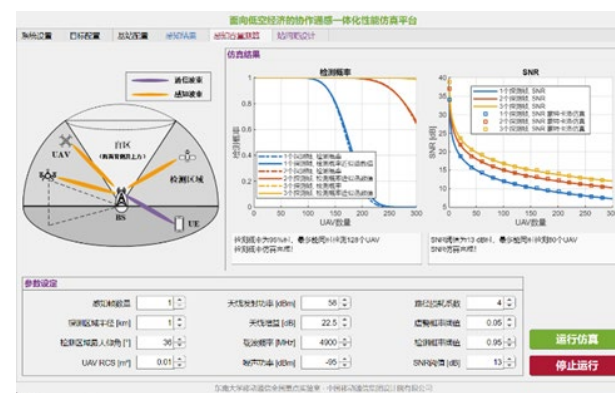
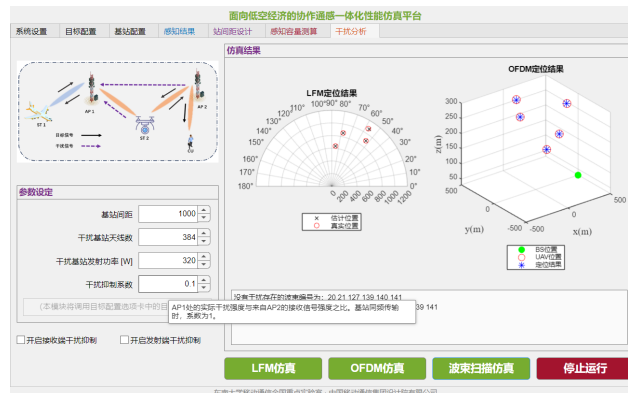
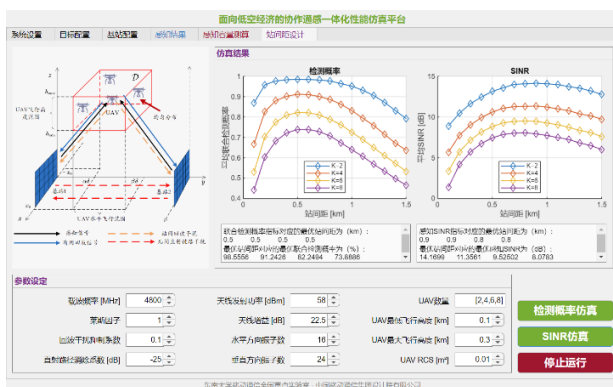
感知参数估计

## 5 应用成果

### 课题组自研通感仿真平台



仿真平台搭建



干扰抑制功能区

# 目录

1

研究背景

2

研究内容

3

研究成果

## 第一作者论文成果:

- [1] Z. Yu, H. Ren, C. Pan, et.al. “Active RIS-Aided ISAC Systems: Beamforming Design and Performance Analysis,” in IEEE Trans. Commun. (**ESI 高被引论文, 主编推荐IEEE Comsoc Outstanding Paper**)
- [2] Z. Yu, H. Ren, C. Pan, et.al. “Addressing the Mutual Interference in Uplink ISAC Receivers: A Projection Method,” in IEEE Wireless Commun. Lett.
- [3] Z. Yu, H. Ren, C. Pan, et.al. “A Framework for Uplink ISAC Receiver Designs: Performance Analysis and Algorithm Development,” in IEEE Trans. Wireless Commun.
- [4] Z. Yu, H. Ren, C. Pan, et.al. “Enhanced Projection-Type Receivers in Uplink ISAC Systems,” in IEEE ICC 2025.  
(**IEEE Comsoc SPCC最佳论文奖, 年度唯一**)
- [5] Z. Yu, H. Ren, C. Pan, et.al. “A Low-Complexity Receiver Design for Uplink ISAC,” in IEEE ICC 2026.

## 项目参与:

- [1] 中国移动-东南大学合作项目: 协作通感组网技术研究
- [2] 华为-东南大学联合实验室项目: 协作通感信号处理算法研究
- [3] 华为无线网络研究部项目: 初代对地感知样机算法设计  
(**优秀实习生, 部门唯一**)
- [4] 国自然重点: 智能超表面辅助毫米波通感一体化
- [5] 国自然面上: 面向关键任务通信的协作通感一体化技术研究
- [6] 国自然外国专家团队项目: 6G协作通感一体化关键技术研究



东南大学 信息科学与工程学院  
SCHOOL OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING

# 请各位老师批评指正!

答辩人：余致远

学号：230825 导师：任红 副教授