

第二届智能超表面技术论坛

THE 2nd RIS TECH Forum

2023年2月12日 中国·杭州

6G智能超表面技术： 先进算法与架构设计

戴凌龙

清华大学电子工程系

2023年2月12日

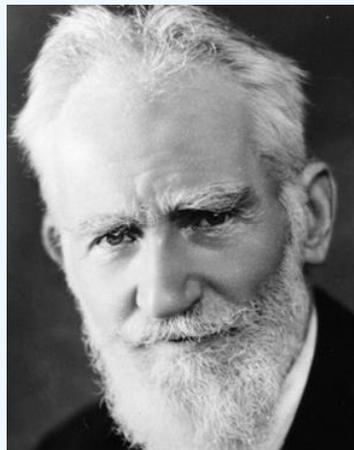


汇报提纲



从1G到5G：被动适应无线环境

● 萧伯纳告诉了我们什么？



萧伯纳

- 理性的人让自己适应环境
- 不理性的人总是让环境适应自己

- 英国文学家
- 1925年获诺贝尔文学奖



从1G到5G：被动适应信道

1G

- Cellular technology

2G

- Digital modulation

3G

- CDMA power control

4G

- OFDM adaptive coding and modulation

5G

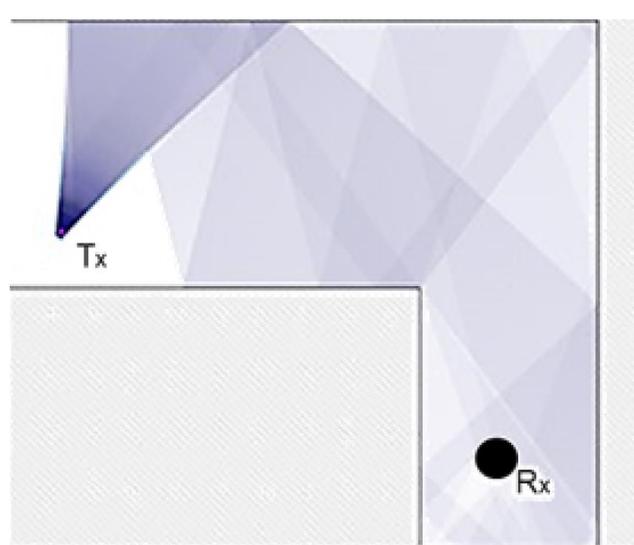
- eMBB/mMTC/uRLLC

从1G到5G，我们可以“适应信道”，那么6G呢

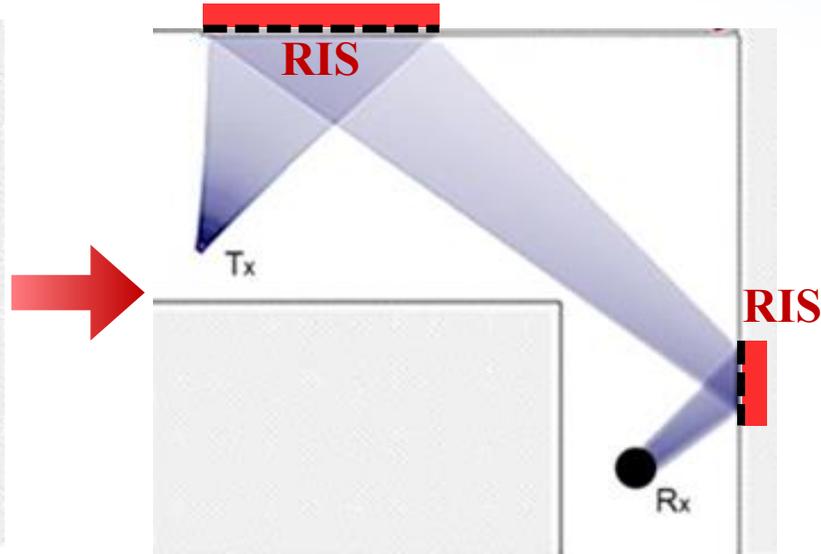


RIS: 从适应环境到改变环境

智能超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, **RIS**）是一种由大量可重构亚波长单元组成的阵列，能够调控入射电磁波的相位、幅度、极化等电磁特性，从而主动改变无线信道环境，有效提升通信系统的性能。



被动适应信道环境



主动改变信道环境



RIS通信系统原型机（视频）

RIS可主动改变环境，被广泛认为是6G潜在关键技术之一

M. Cui, Z. Wu, Y. Chen, S. Xu, F. Yang, and L. Dai, "Demo: Low-power communications based on RIS and AI for 6G," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (IEEE ICC'22)*, Seoul, Korea, May 2022. (**IEEE ICC 2022 Outstanding Demo Award**)

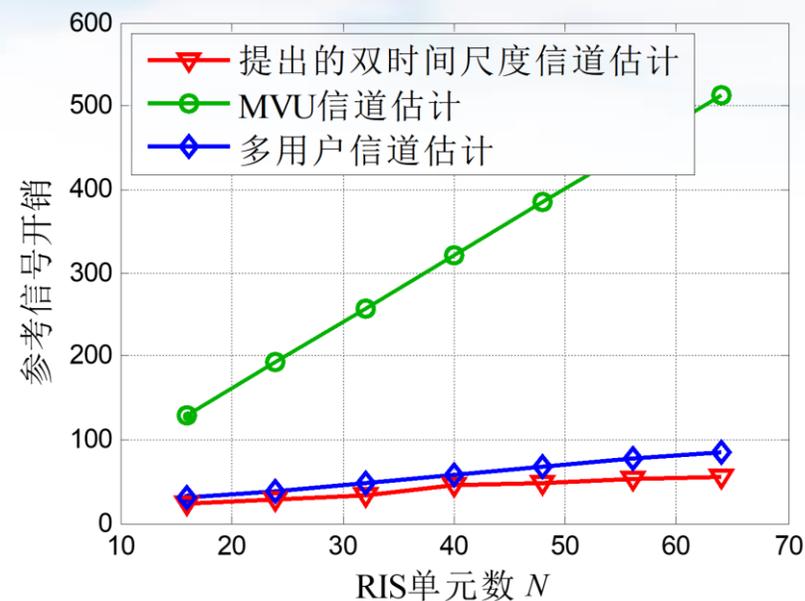
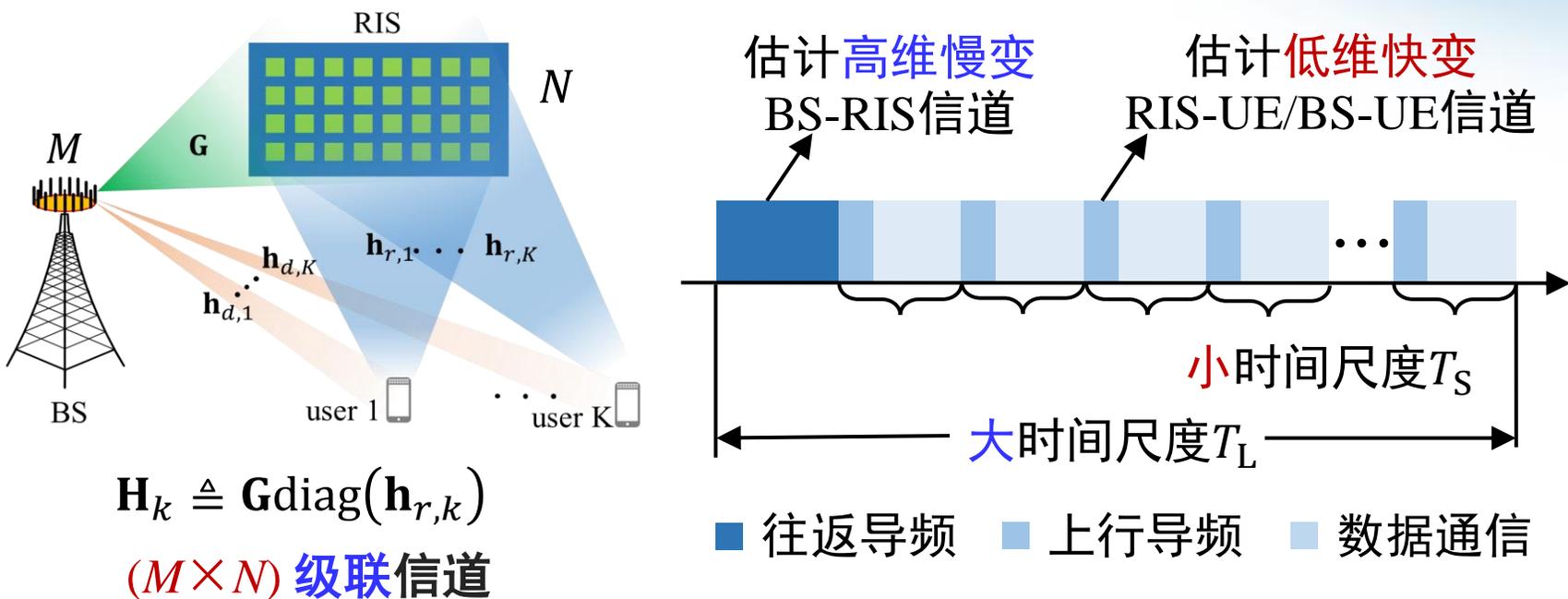


汇报提纲



双时间尺度信道估计方法

RIS维度高，估计BS-RIS-UE级联信道**导频开销大**。利用BS-RIS子信道**高维慢变**、RIS-UE子信道**低维快变**的特性，从**大小时间尺度**分别估计两段子信道。

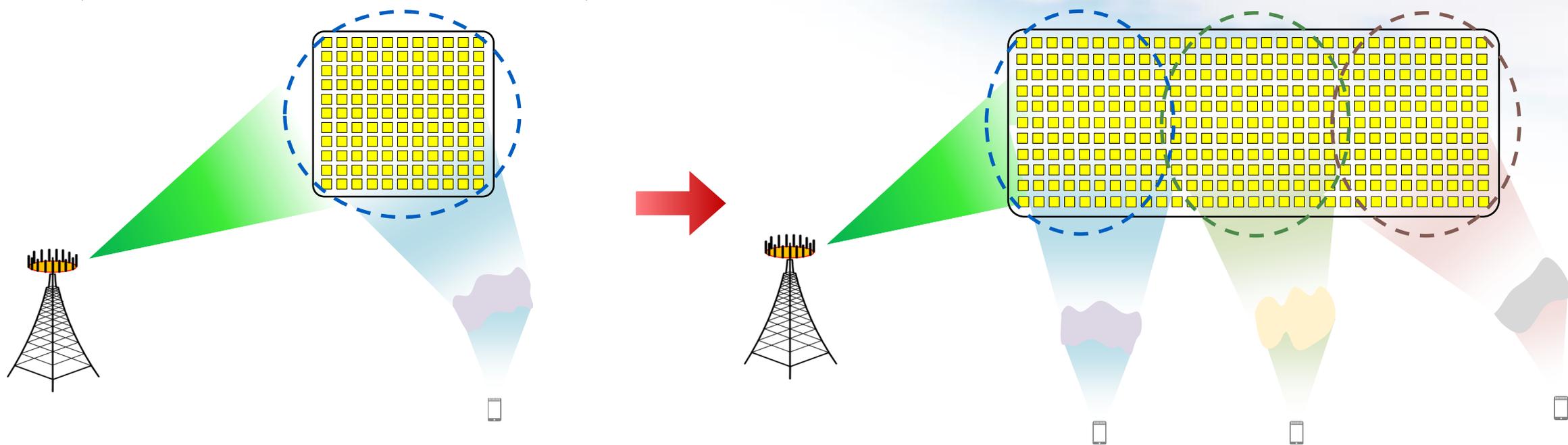


利用级联信道的双时间尺度特性，**大幅降低**导频开销

C. Hu, L. Dai, S. Han, and X. Wang, "Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 11, pp. 7736-7747, Nov. 2021.

超大规模RIS空间非平稳

超大规模RIS系统存在**空间非平稳**现象，RIS阵面上的不同部分对应的散射环境可能**不同**，而RIS只能整体反射信号，**无法分辨**阵面不同部分的接收信号。



小规模RIS：整个阵面散射环境**相同**

超大规模RIS：阵面不同部分对应的散射环境**不同**

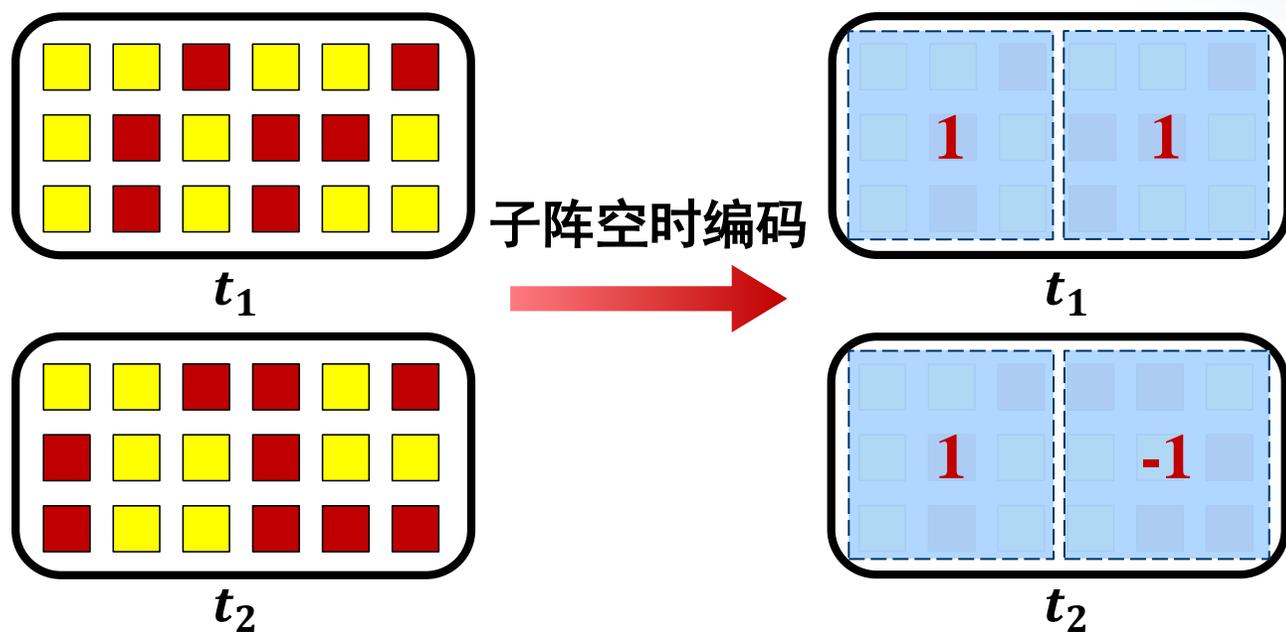
现有信道估计方法**无法**精确估计空间非平稳信道

Z. Yuan, J. Zhang, Y. Ji, G. F. Pedersen, and W. Fan, "Spatial non-stationary near-field channel modeling and validation for massive MIMO systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 1, pp. 921-933, Jan. 2023.



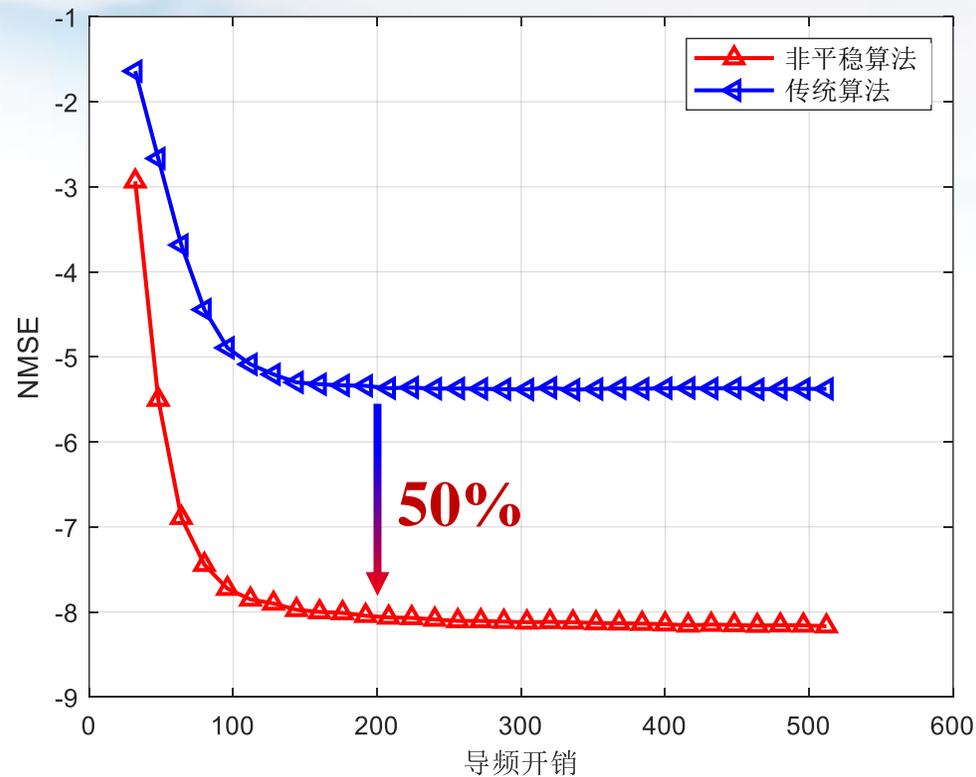
高精度空间非平稳信道估计方法

受经典Alamouti编码启发，把RIS划分为多个子阵，不同时间隙内按空时编码方式整体变化，接收端通过空时译码分别求解RIS阵面不同子阵对应的空间平稳信道。



各时间隙RIS配置相同，
无法提取各子阵对应信号

各时间隙RIS配置按子阵整体变化，
可以提取各子阵对应信号

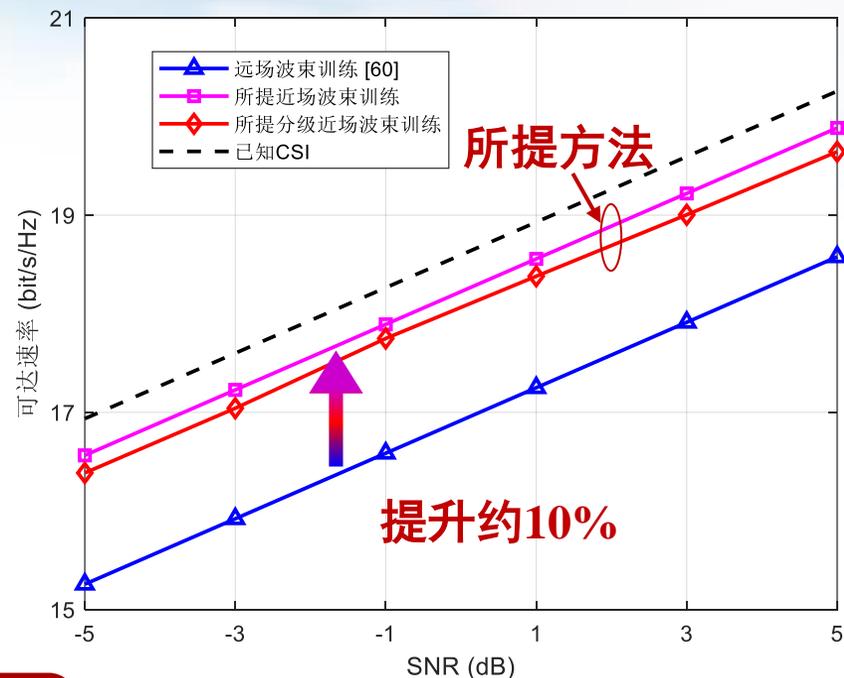
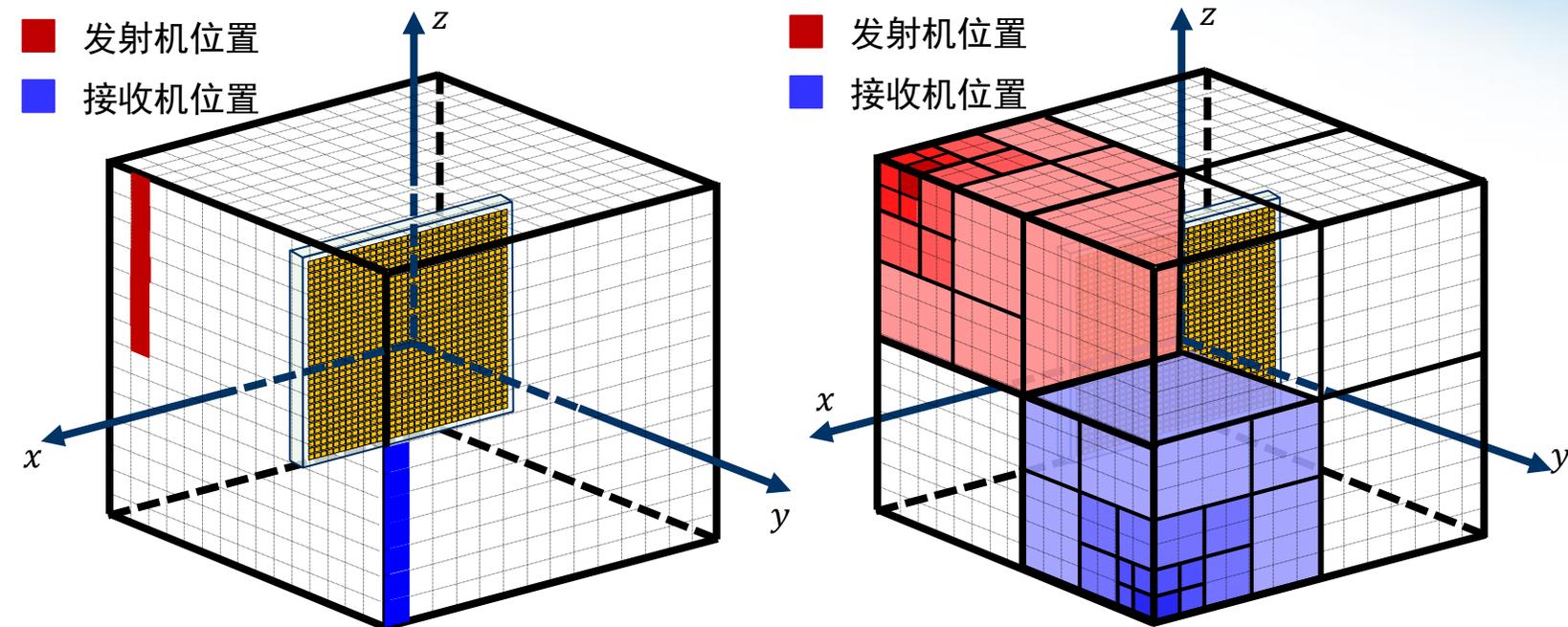


把空间非平稳信道转为空间平稳信道，大幅提升信道估计精度



近场RIS码本设计与波束训练

RIS近场码本尺寸过大，遍历式波束训练开销过高。构造分层近场码本，逐层缩小角度和距离维度上的采样范围和采样步长，实现分层近场波束训练。



近场码本可以显著提升波束训练性能

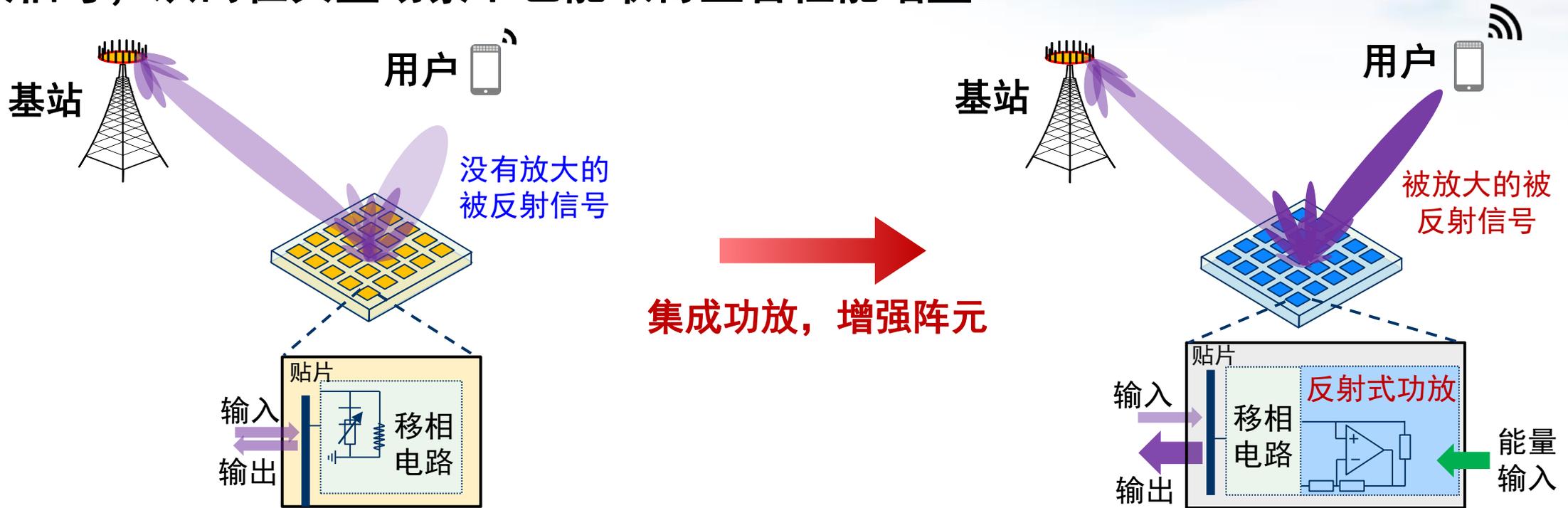
X. Wei, L. Dai, Y. Zhao, G. Yu, and X. Duan, "Codebook design and beam training for extremely large-scale RIS: Far-field or near-field?" *China Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 193-204, Jun. 2022. (Invited Paper)

汇报提纲



从无源RIS到有源RIS技术

“乘性衰落”效应导致RIS反射链路路损较大，使得无源RIS在直射径较强的典型场景下难以获得显著的性能增益。为此，提出**有源RIS**技术，在反射信号的同时放大信号，从而在典型场景下也能取得显著性能增益。

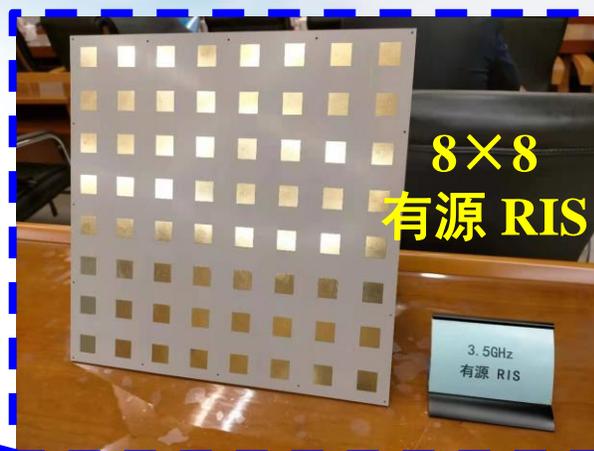
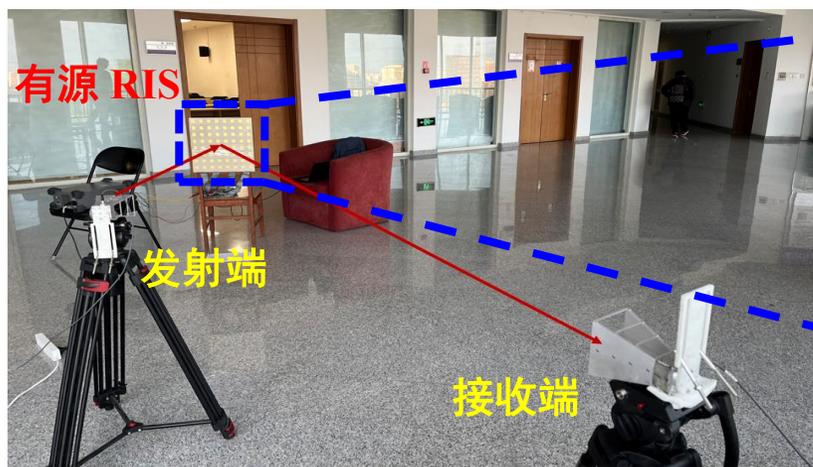


(a) 无源RIS：反射信号而不放大

(b) 有源RIS：反射信号被放大

有源RIS链路性能实测

搭建了**64单元有源RIS**辅助的无线通信系统，并进行了现场传输测试。链路实测结果表明，用户接收信号功率提升**10 dB**。



| 系统参数 | 数值 |
|------|--------------|
| 中心频点 | 3.55 GHz |
| 带宽 | 40 MHz |
| 极化 | 垂直（入射）水平（出射） |
| 反射角度 | 0° ~ 60° |
| 入射角度 | 0° |

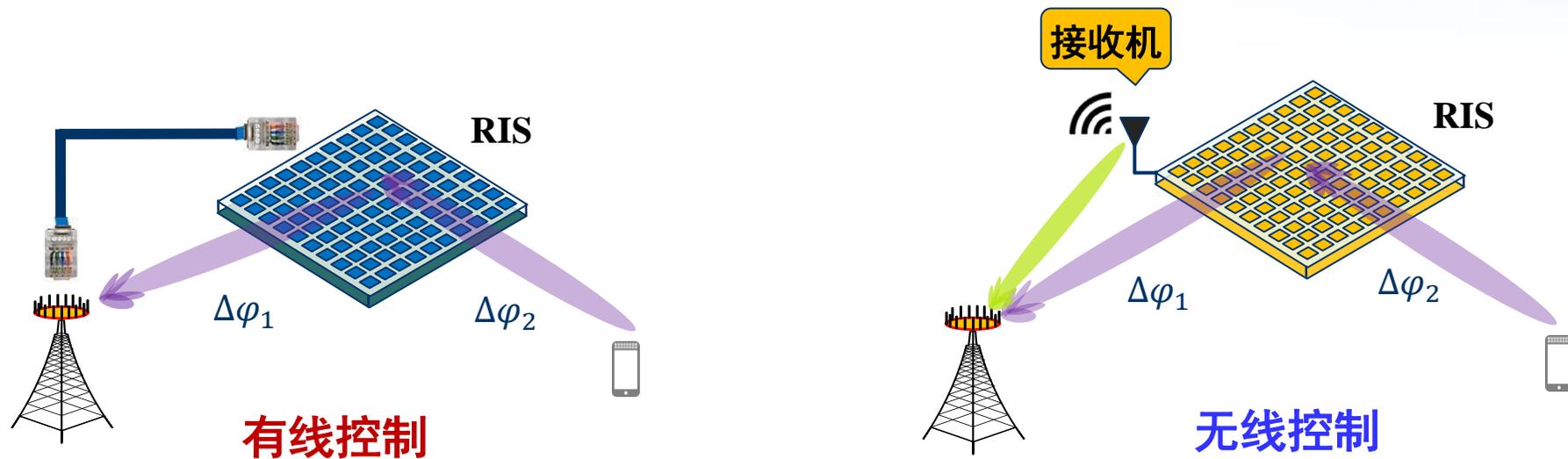
| 设备 | 接收功率 | 传输速率 |
|--------|----------|----------|
| 金属板 | -110 dBm | 1.2 MHz |
| 有源 RIS | -100 dBm | 28.5 MHz |
| 金属板 | -105 dBm | 1.5 MHz |
| 有源 RIS | -95 dBm | 30 MHz |



RIS的控制难题

● RIS通常受基站控制

- **控制流程复杂**：信道估计→预编码计算→RIS控制信令
- **有线控制**：有线铺设成本，部署位置受限
- **无线控制**：RIS上需要额外配置无线接收机

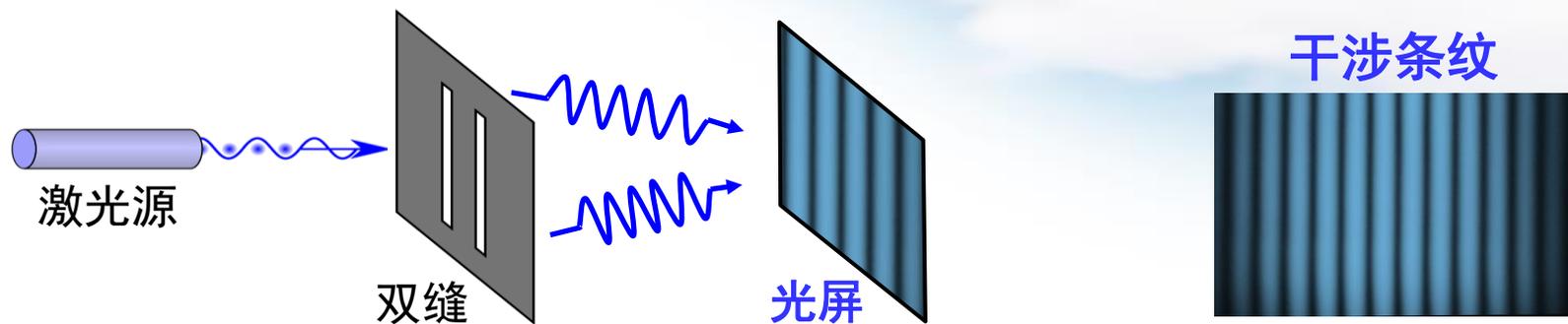


RIS受控制于基站，**流程复杂、成本高**，大规模部署困难

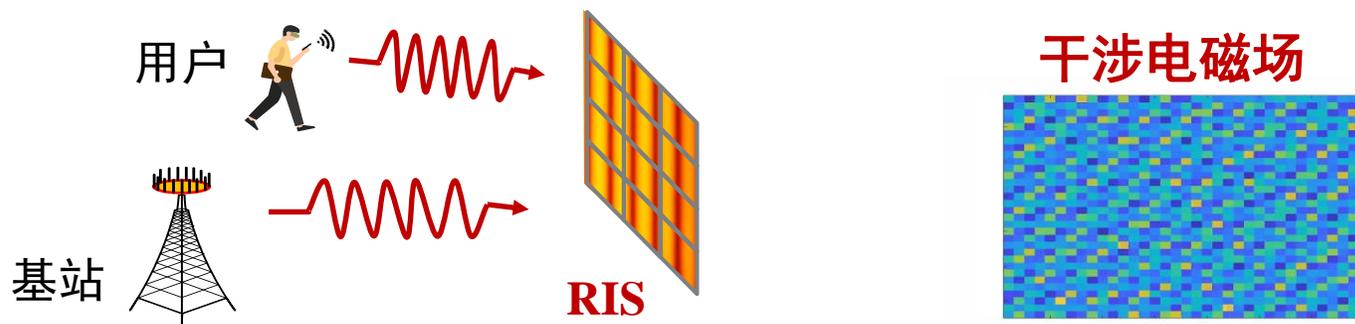


从光学干涉到电磁干涉

光学干涉：两列光相遇时发生叠加或抵消形成明暗条纹



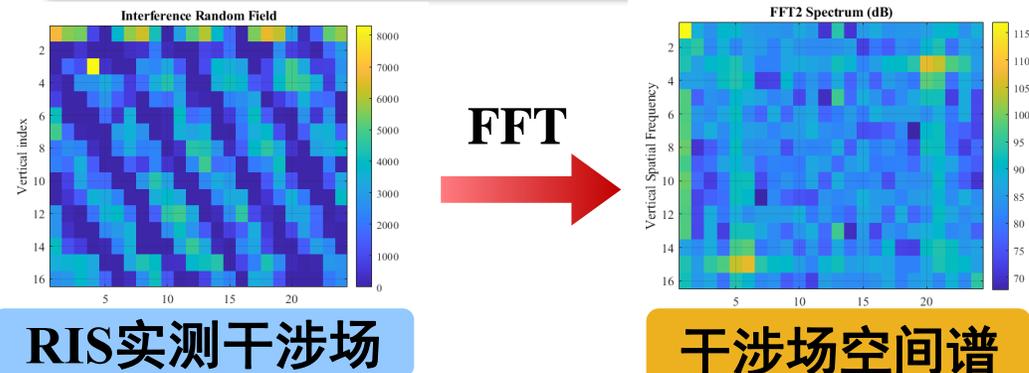
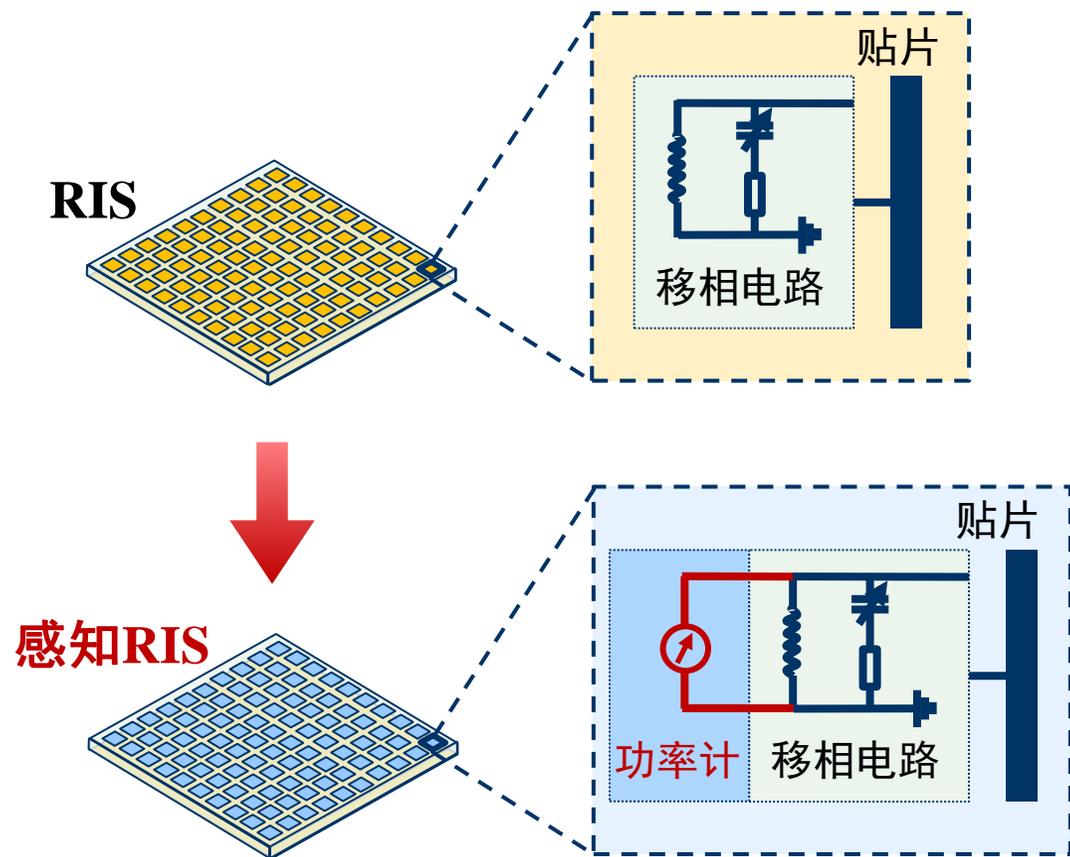
电磁干涉：两列电磁波相遇时发生叠加或抵消形成幅度分布



电磁干涉：把难以获取的信道相位信息转化为较易获取的电磁场功率信息

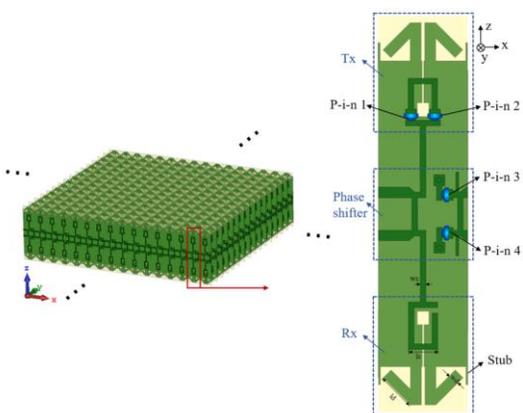
感知RIS硬件研制与实测

研制了两块 16×16 单元感知RIS硬件，实测到电磁干涉现象，算法可估计用户方位，初步验证了感知RIS的原理和软硬件联合设计方案。

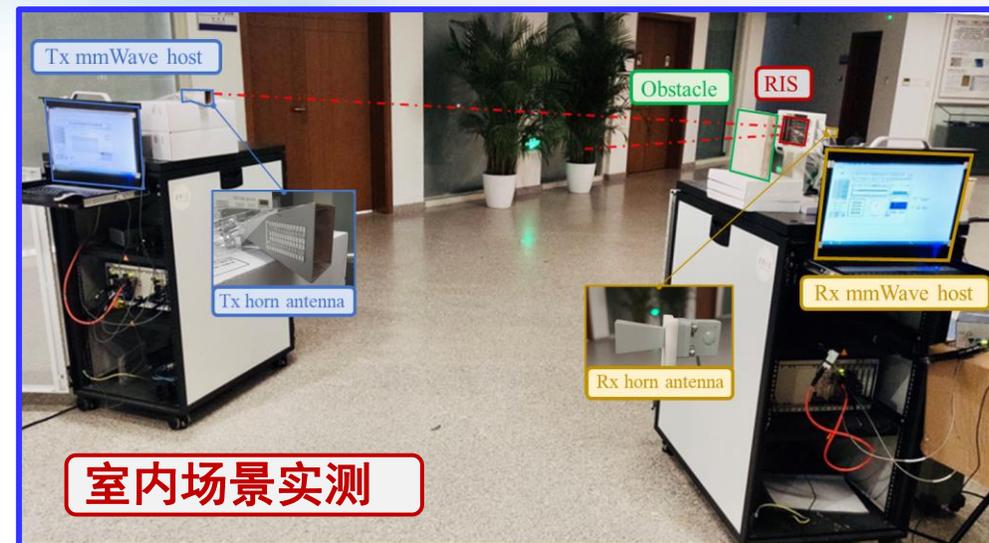
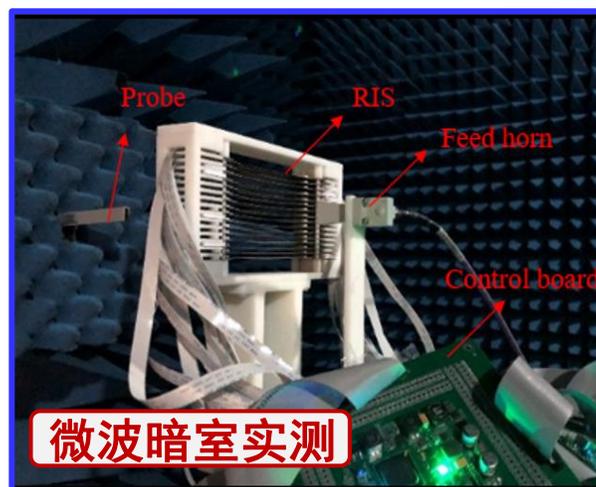


透射式RIS

研制2-bit相位调制的 16×16 毫米波透射式RIS，搭建了透射式RIS辅助的毫米波通信平台，对透射式RIS的增益进行了测试。



透射式RIS设计



| 参数 | 数值 |
|-----------|------------------|
| 工作频段 | 27 GHz @ 800 MHz |
| 移相精度 | 2 bit |
| 发射端-RIS距离 | 2 m |
| RIS-接收端距离 | 0.05 m |

| 是否部署RIS | 系统吞吐量 | 发射功率 |
|---------|-----------|----------|
| 否 | 1024 Mbps | 13.6 dBm |
| 是 | 1024 Mbps | 5.4 dBm |

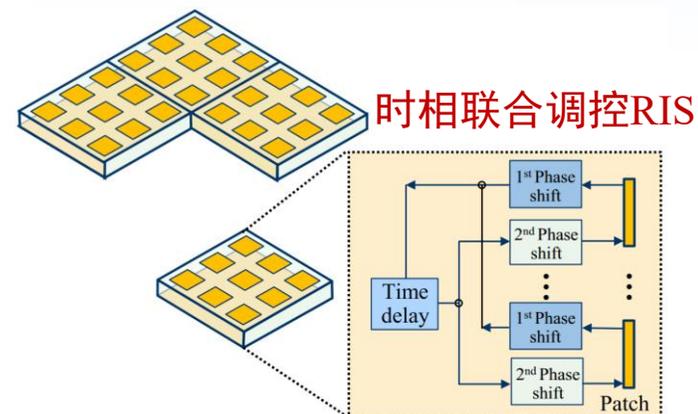
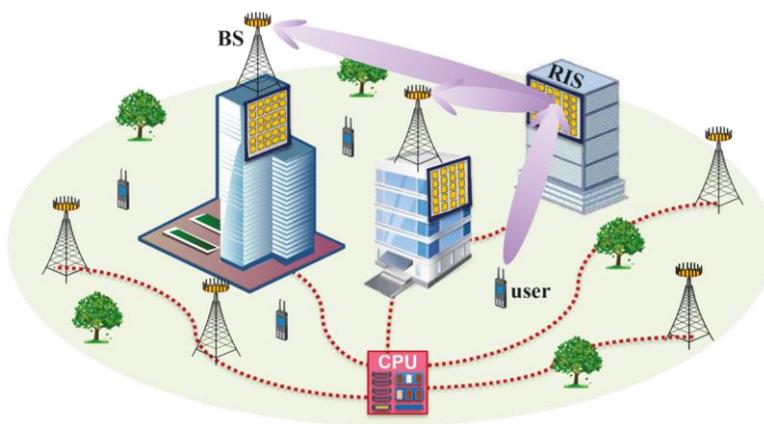
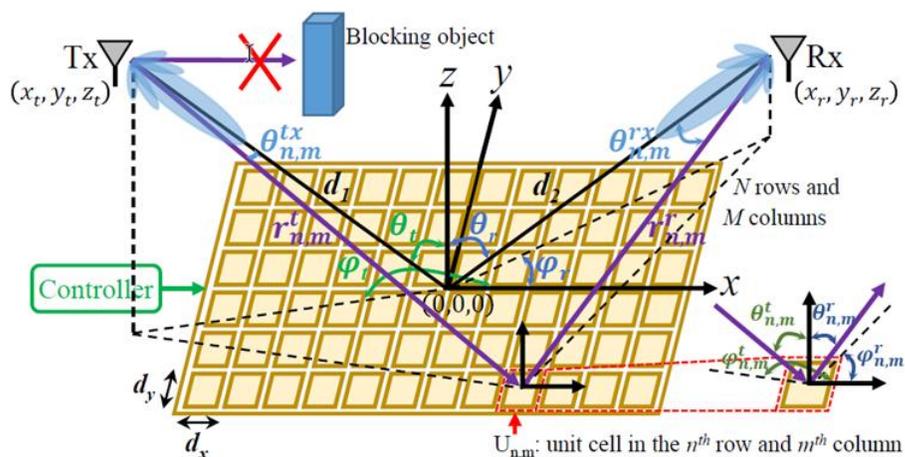
J. Tang, M. Cui, S. Xu, L. Dai, F. Yang, and M. Li, "Transmissive RIS for 6G communications: Design, prototyping, and experimental demonstrations," *IEEE Trans. Commun.*, major revision, Jun. 2022.

汇报提纲



未来方向

- **高精度3D信道建模**和信道容量的理论极限^[1]
- **无蜂窝网络**中使用RIS以低功耗进一步降低用户间干扰^[2]
- RIS的**带宽受限问题**，单元结构和控制电路的优化设计^[3]
- **宽带场景下RIS的波束分裂问题**，**时相联合调控RIS架构与算法**^[4]



- [1] W. Tang, M. Chen, X. Chen, J. Dai, Y. Han, M. D. Renzo, Y. Zeng, S. Jin, Q. Cheng, and T. J. Cui, "Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 1, pp.421-439, Jan. 2021.
- [2] Z. Zhang and L. Dai, "A joint precoding framework for wideband reconfigurable intelligent surface-aided cell-free network," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 4085-4101, Aug. 2021.
- [3] H. Li, C. Zheng, H. Xu, J. Li, C. Song, F. Yang, J. Li, W. Shi, Y. Zhang, and J. Yao, "All-graphene geometric terahertz metasurfaces for generating multi-dimensional focused vortex beams," *Optics & Laser Technol.*, vol. 159, pp. 108986, Apr. 2023.
- [4] R. Su and L. Dai, "Wideband precoding for RIS-aided THz communications," *IEEE Trans. Commun.*, major revision, Dec. 2022.



汇报提纲



报告小结

● RIS先进算法

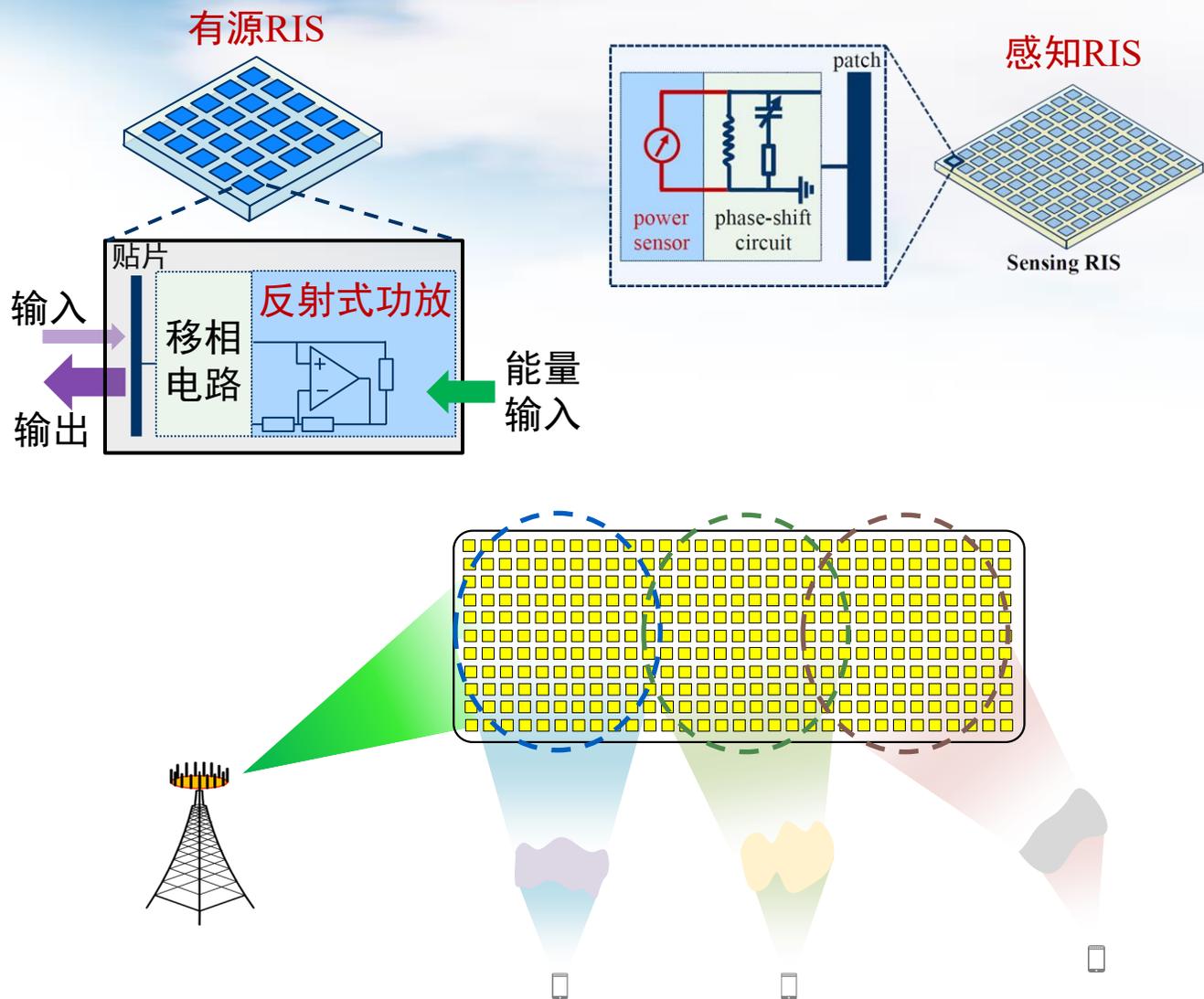
- 双时间尺度信道估计方法
- 高精度空间非平稳信道估计
- 近场RIS码本设计与波束训练

● RIS架构设计

- **有源RIS**: 克服“乘性衰落”效应
- **感知RIS**: 基于干涉场的信道估计技术
- **透射式RIS**: 增强信号透射能力

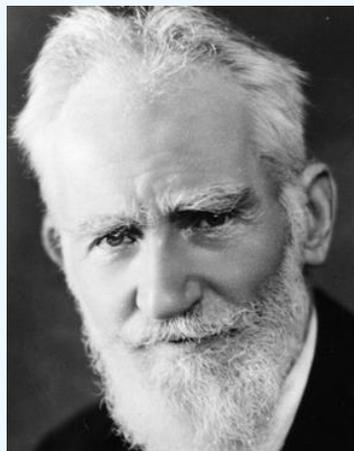
● RIS未来方向

- 高精度3D信道建模
- RIS辅助的无蜂窝网络
- 宽带RIS的设计与通信



6G智能超表面技术：主动改变环境

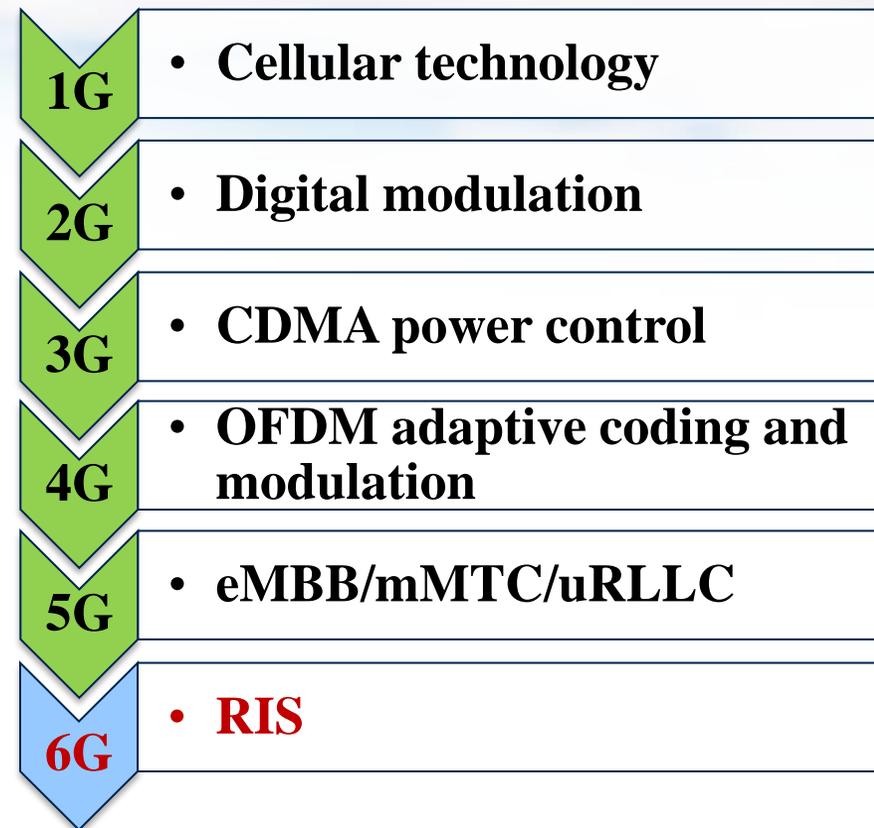
● 萧伯纳还告诉了我们什么？



萧伯纳

- 理性的人让自己适应环境
- 不理性的人总是让环境适应自己
- 但历史是后一种人创造的

- 英国文学家
- 1925年获诺贝尔文学奖



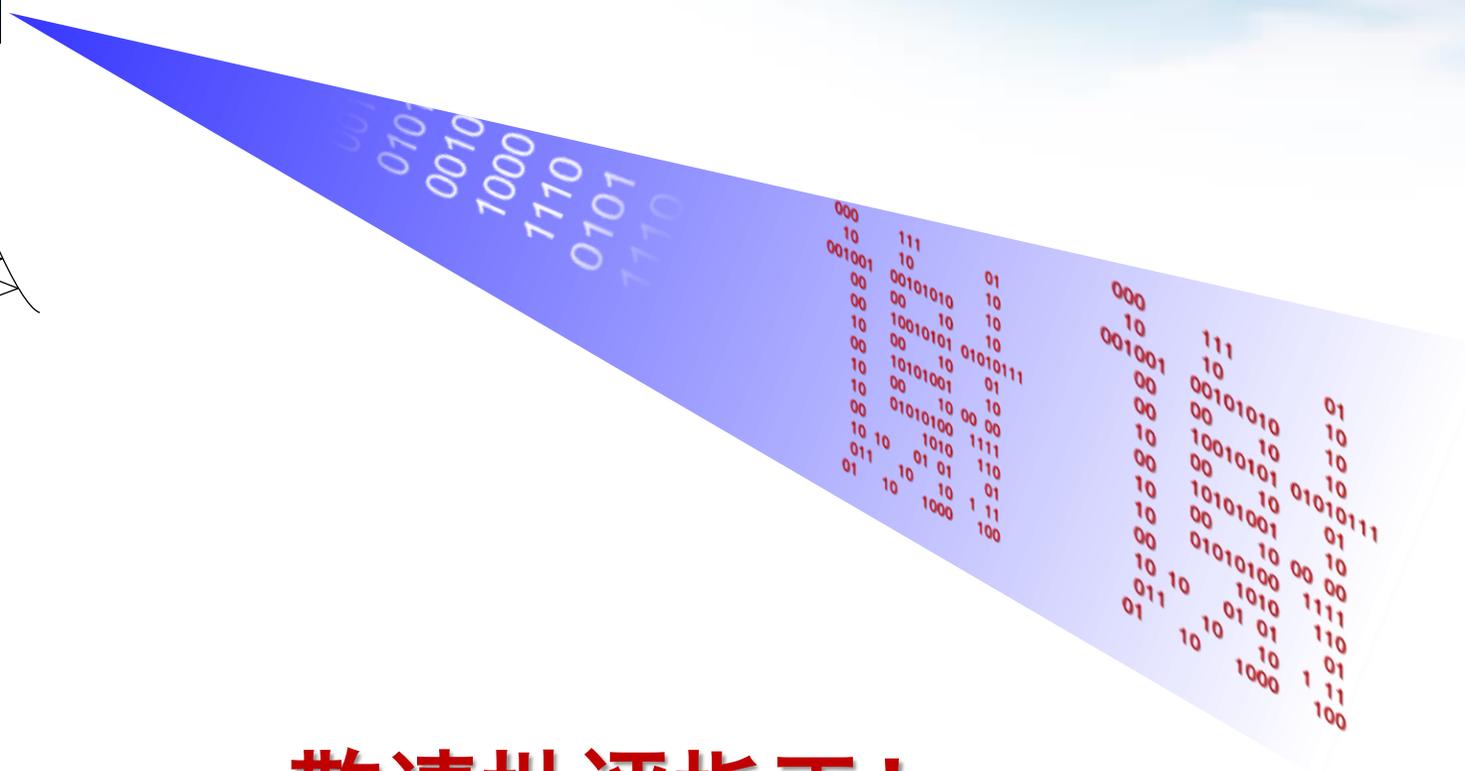
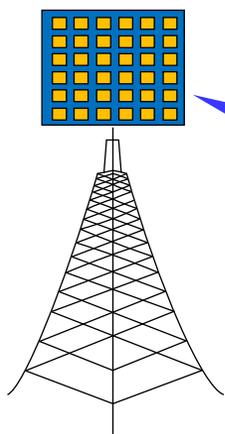
RIS为6G改变信道提供了新机会！



第二届智能超表面技术论坛

THE 2nd RIS TECH Forum

2023年2月12日 中国·杭州



敬请批评指正！

