



# 2019年度浙江省信息通信技术前沿论坛

## 可重构智能表面

——从适应信道到改变信道的范式转变

戴凌龙

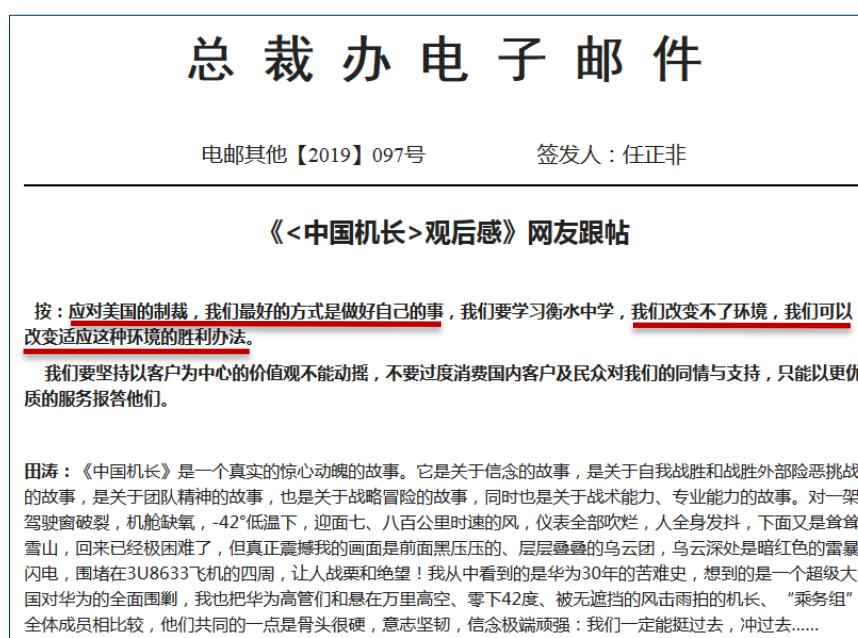
清华大学

2019年11月16日

# 从华为任正非的《中国机长》观后感说起.....

## ● 2019年10月9日，任正非签发华为总裁办电子邮件

- “应对美国的制裁，我们最好的方式是做好自己的事”
- “我们改变不了环境，我们可以改变适应这种环境的胜利办法”



无线传播环境不可控，只能“适应信道”

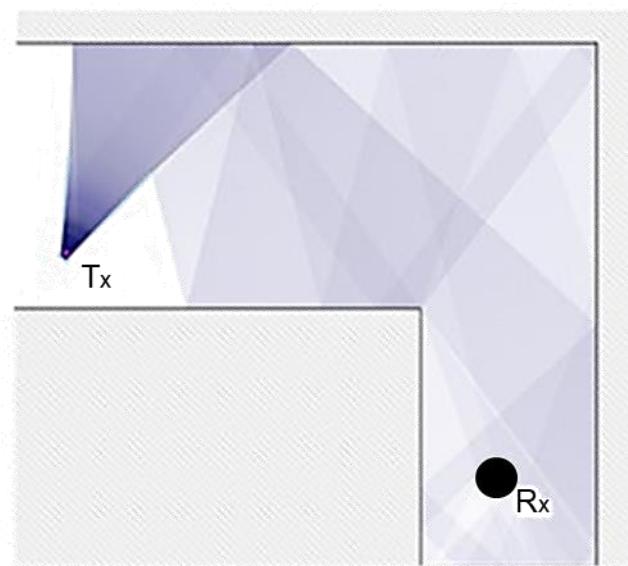


# 报告提纲

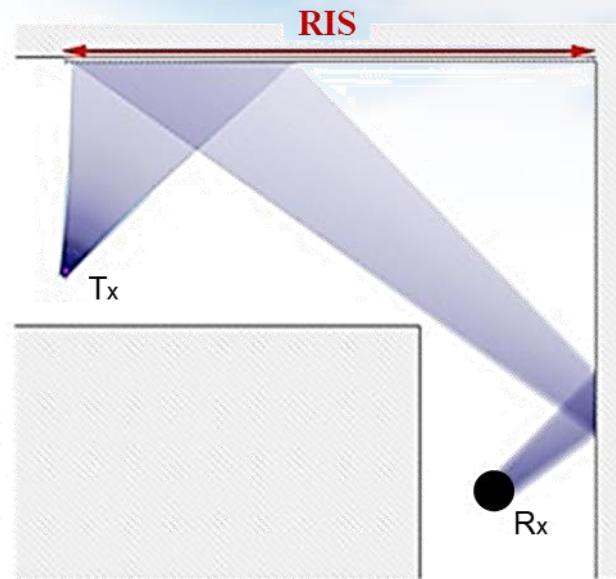
- 1 RIS基本原理
- 2 RIS预编码设计
- 3 RIS信道估计
- 4 RIS天线设计
- 5 RIS硬件平台
- 6 挑战与机遇

# 可重构智能表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）

- 部署可控电磁材料组成的表面来调控电磁波
- 显著提升接收信号质量



传统无线通信：  
被动适应信道环境

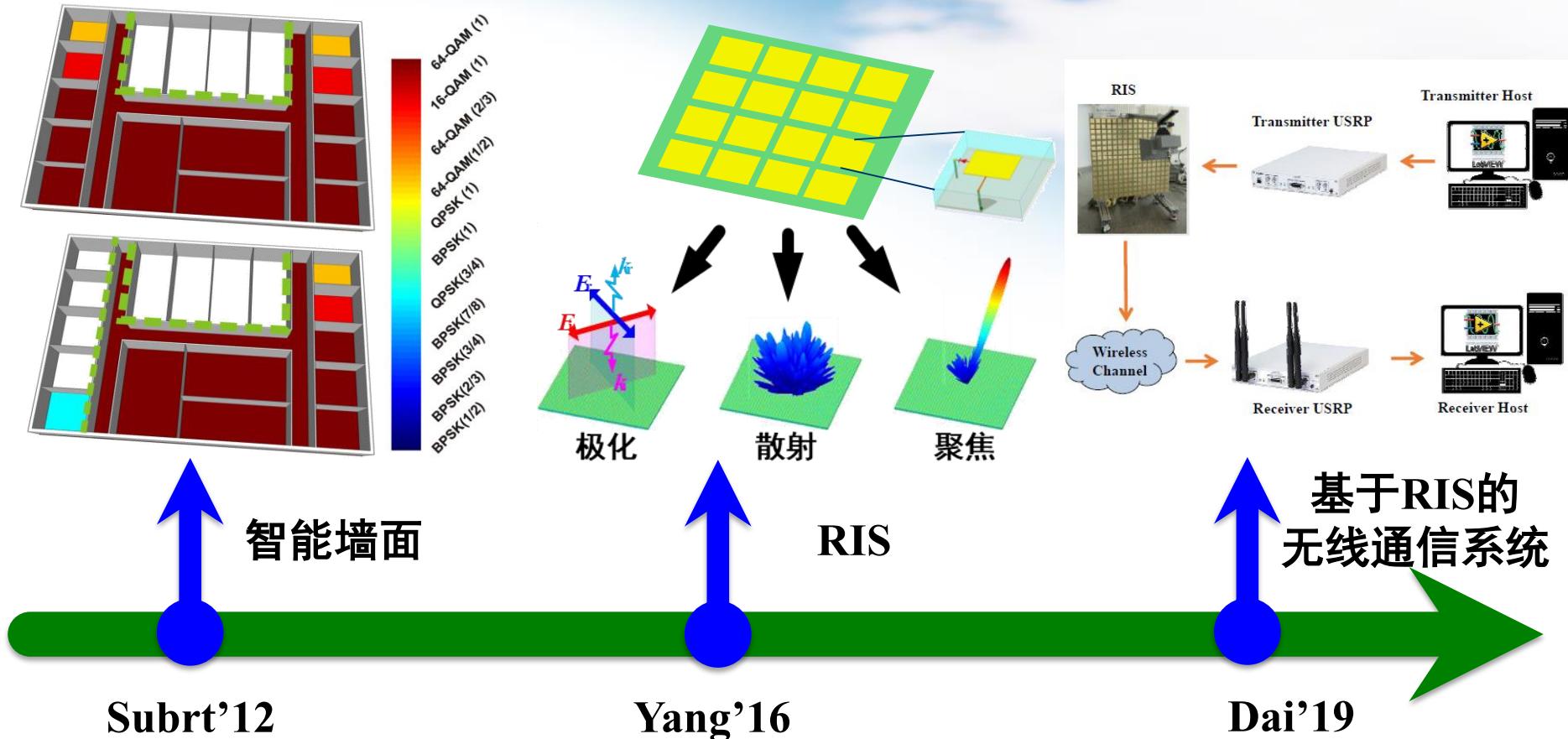


RIS辅助的无线通信：  
主动改变信道环境

6G移动通信备选技术之一

[Zhao'19] J. Zhao and Y. Liu, "A Survey of Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs): Towards 6G Wireless Communication Networks," arXiv preprint arXiv:1905.00152, Jun. 2019.

# RIS的发展历程



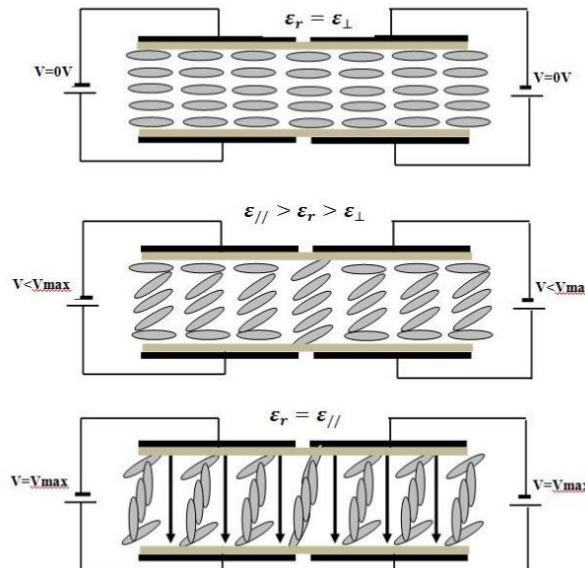
[Subrt'12] L. Subrt and P. Pechac, "Controlling propagation environments using intelligent walls," in *Proc. 2012 6th European Conf. Antennas Propag. (EUCAP)*, Prague, Czech Republic, Mar. 2012, pp. 1–5.

[Yang'16] H. Yang, X. Cao, F. Yang, J. Gao, S. Xu, M. Li, X. Chen, Y. Zhao, Y. Zheng, and S. Li, "A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control," *Scientific Reports*, vol. 6, p. 35692 EP, Oct. 2016.

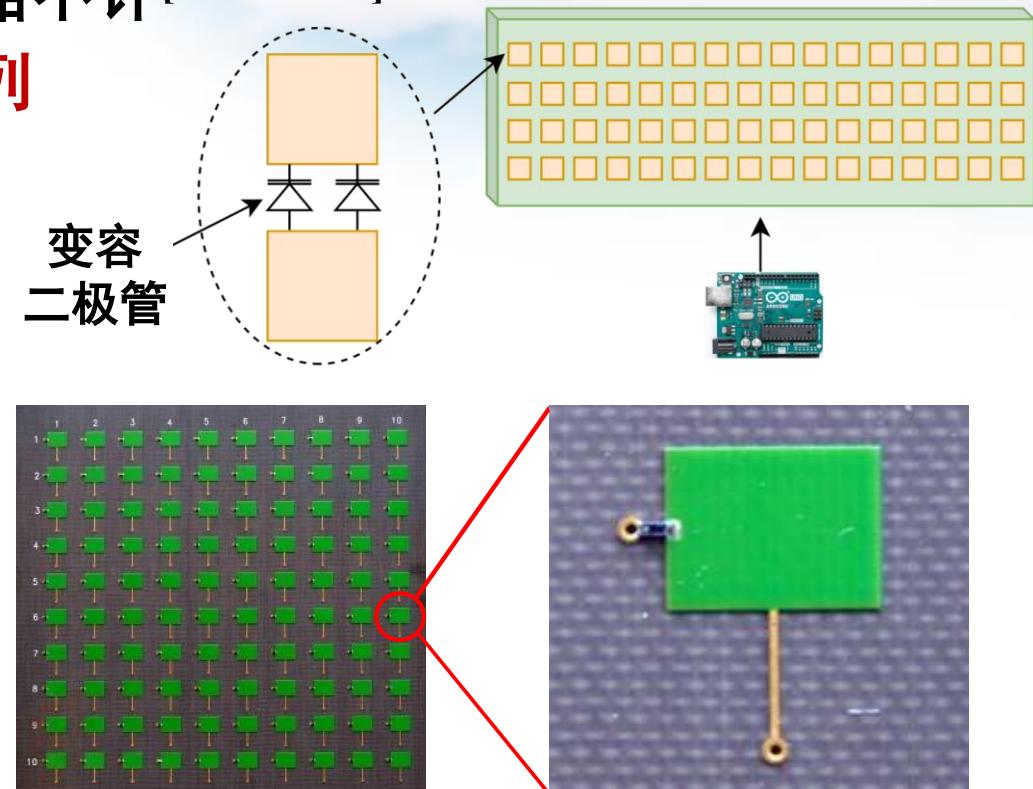
[Dai'19] L. Dai, B. Wang, M. Wang, X. Yang, et al. "Reconfigurable intelligent surface-based wireless communication: Antenna design, prototype development and experimental results," submitted for publication, 2019.

# RIS的基本原理

- 可控电磁材料：液晶、变容二极管、PIN管
- 无源器件：加性噪声可忽略不计[Ntontin'19]
- 低成本器件组成大规模阵列



液晶材料

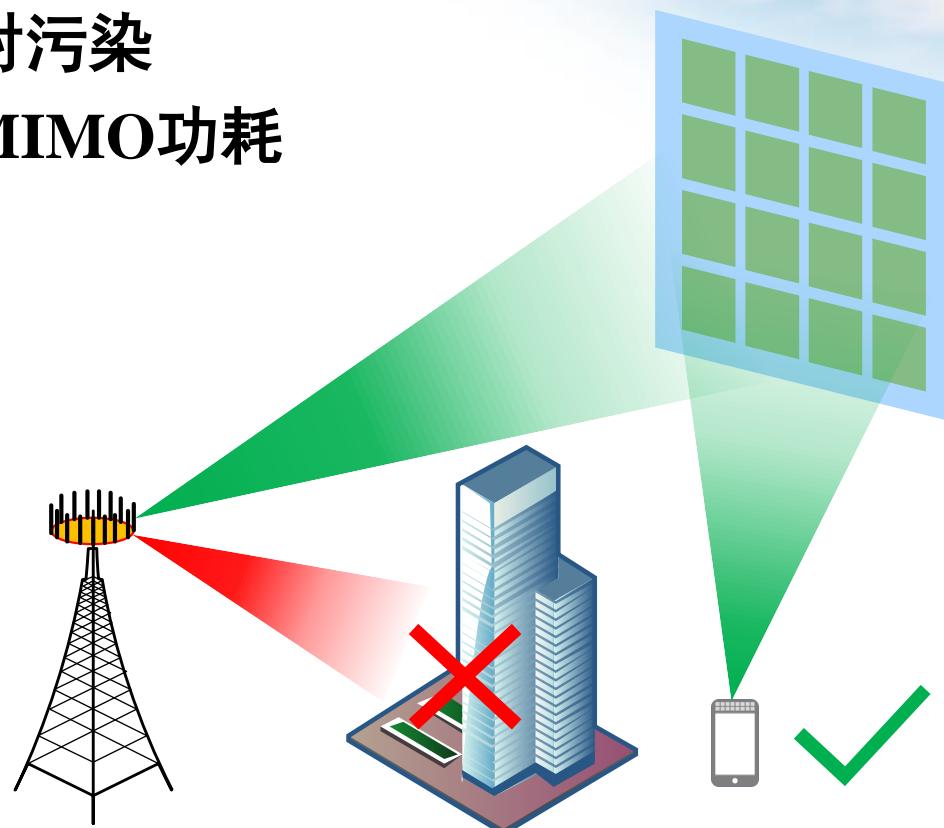


半导体PIN二极管

[Ntontin'19] K. Ntontin, M. Di Renzo, J. Song, F. Lazarakis, J. de Rosny, D. -T. Phan-Huy, O. Simeone, R. Zhang, M. Debbah, G. Leroesey, M. Fink, S. Tretyakov, S. Shamai, "Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison," arXiv preprint arXiv:1908.08747, Aug. 2019.

# RIS的应用场景

- 高频段：克服中断
- 低频段：增强信号
- 降低电磁辐射污染
- 降低大规模MIMO功耗



[Basar'19] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. Alouini, and R. Zhang, "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753-116773, 2019.

# RIS的系统模型（以下行为例）

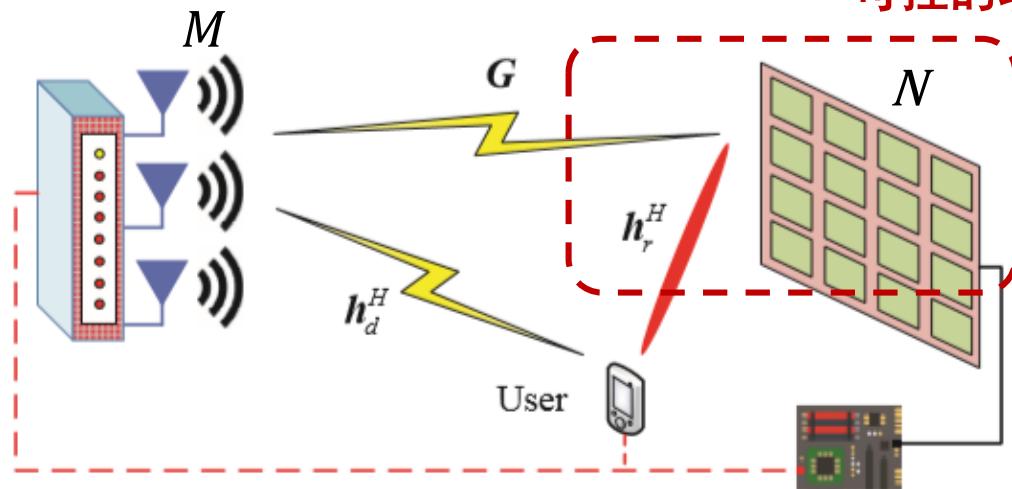
- 求和形式

$$y = \mathbf{h}_d^H \mathbf{x} + \sum_{n=1}^N \mathbf{h}_r^*(n) \boldsymbol{\varphi}(n) \mathbf{G}(n,:) \mathbf{x} + n$$

直达部分      RIS反射部分

- 矩阵形式

$$y = \left[ \mathbf{h}_d^H + \underbrace{\mathbf{h}_r^H \text{diag}(\boldsymbol{\varphi}) \mathbf{G}}_{\text{可控的联合反射信道}} \right] \mathbf{x} + n$$



$$\mathbf{h}_d \in \mathbb{C}^{M \times 1}$$

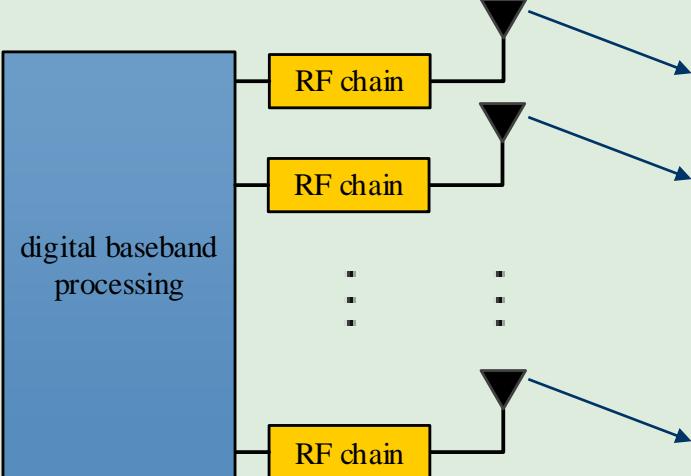
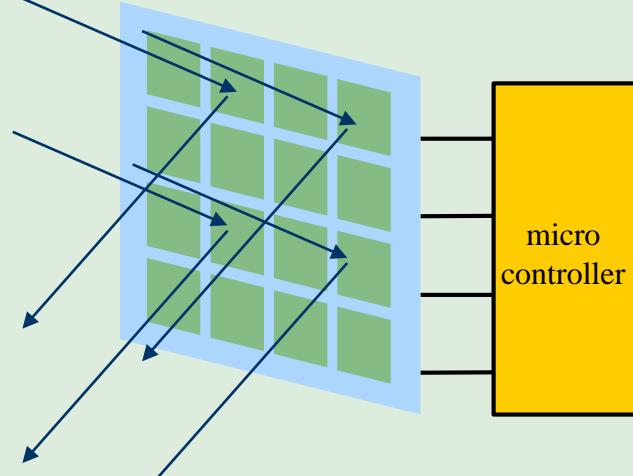
$$\mathbf{h}_r \in \mathbb{C}^{N \times 1}$$

$$\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$$

$$\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$$

[Basar'19] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. Alouini, and R. Zhang, "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753-116773, 2019.

# RIS vs. 大规模MIMO

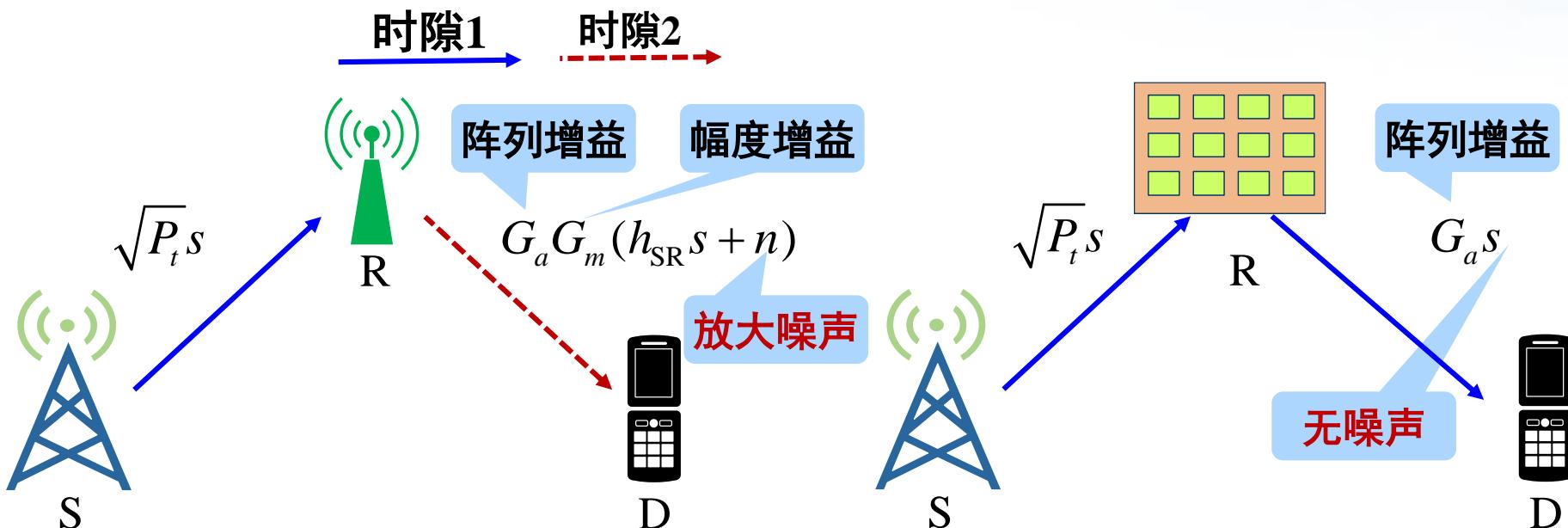
	大规模MIMO	可重构电磁表面 (RIS)
系统结构		
能否波束赋形	能	能
工作方式	发射/接收信号	调控信道环境
射频链路	有	无
能否信号处理	能	不能
成本	较高	低
功耗	较高	极低

# RIS vs. 中继

## ● 传统中继

- 解调转发中继（DF）：中继解调基站发送的信号，再转发给用户
- 放大转发中继（AF）：中继直接将接收信号转发给用户

## ● 智能反射表面（RIS）



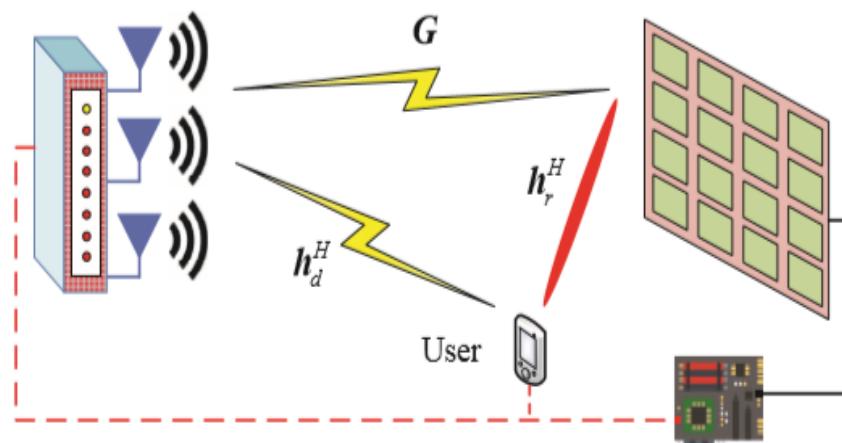
**RIS：**无需解调信号或放大信号，噪声可忽略，实时处理，功耗非常低

# 报告提纲

- 1 RIS基本原理
- 2 RIS预编码设计
- 3 RIS信道估计
- 4 RIS天线设计
- 5 RIS硬件平台
- 6 挑战与机遇

# RIS预编码

- 系统模型：直射路径 + RIS反射路径
- 预编码：基站预编码 + 智能反射表面预编码



$$y = [\mathbf{h}_d^H + \mathbf{h}_r^H \text{diag}(\boldsymbol{\varphi}) \mathbf{G}] \mathbf{x} + n$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \text{diag}(\boldsymbol{\varphi}) \quad \mathbf{x} = \mathbf{w}\mathbf{s}$$

$$y = [\mathbf{h}_d^H + \mathbf{h}_r^H \boldsymbol{\Phi} \mathbf{G}] \mathbf{w}\mathbf{s} + n$$

RIS预编码

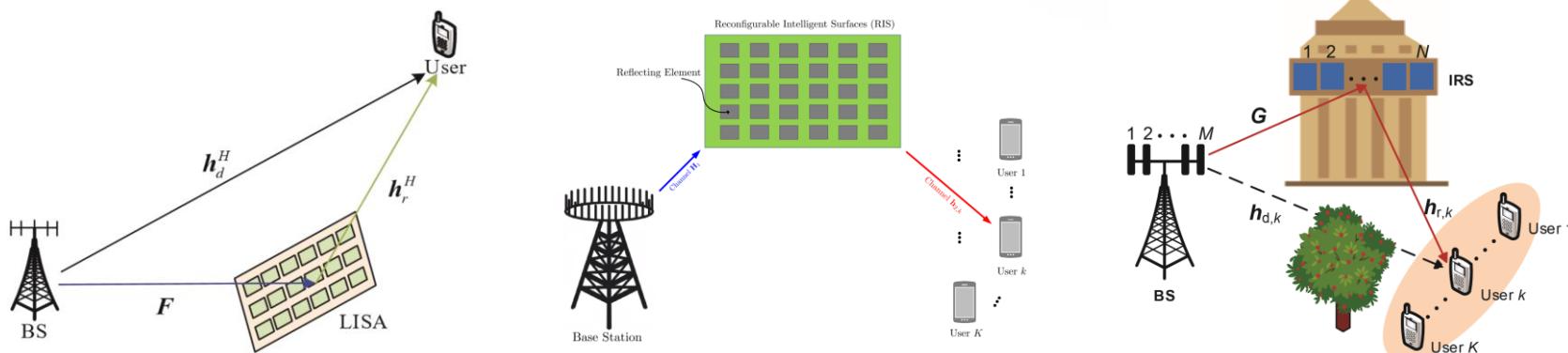
基站预编码

根据特定需求进行预编码联合优化

# 现有的RIS预编码方法

## ● 联合预编码常见优化目标：

- RIS辅助的毫米波通信系统联合预编码设计 [Wang'19]
- 最大化用户和速率的联合预编码设计 [Guo'19]
- 最大化能量效率的联合预编码设计 [Huang'19]
- 最小化发射功率的联合预编码设计 [Wu'19]



[Wang'19] P. Wang, J. Fang, X. Yuan, Z. Chen, H. Duan, and H. Li, “Intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave communications: Joint active and passive precoding design,” arXiv preprint arXiv:1908.10734, Aug. 2019.

[Guo'19] H. Guo, Y.-C. Liang, J. Chen, and E. G. Larsson, “Weighted sum rate optimization for intelligent reflecting surface enhanced wireless networks,” arXiv preprint arXiv:1905.07920, May 2019.

[Huang'19] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen, “Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication,” arXiv:1810.06934, Jun. 2019.

[Wu'19] Q. Wu and R. Zhang, “Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts,” arXiv preprint arXiv:1906.03165, Jun. 2019.

# RIS预编码问题建模

- 最大化用户接收信噪比 (SNR) 的预编码联合优化方案

- 系统模型:  $y = [\mathbf{h}_d^H + \mathbf{h}_r^H \Phi \mathbf{G}] \mathbf{w} \mathbf{s} + n$
- 最大化SNR问题

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{w}, \Phi} \left| (\mathbf{h}_r^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H) \mathbf{w} \right|^2 \\ \text{s.t. } & \|\mathbf{w}\|^2 \leq p \\ \Phi = \text{diag} & \left( e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_M} \right) \end{aligned}$$

就近原则选取  $\downarrow$

$$\theta_m \in \left\{ 0, \frac{2\pi}{\tau}, \dots, \frac{2\pi(\tau-1)}{\tau} \right\}$$

**联合优化** **离散相位限制**

**挑战:** RIS离散相位, 性能非最优, 联合优化复杂度过高

[Wang'19] P. Wang, J. Fang, X. Yuan, Z. Chen, H. Duan, and H. Li, "Intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave communications: Joint active and passive precoding design," arXiv preprint arXiv:1908.10734, Aug. 2019.

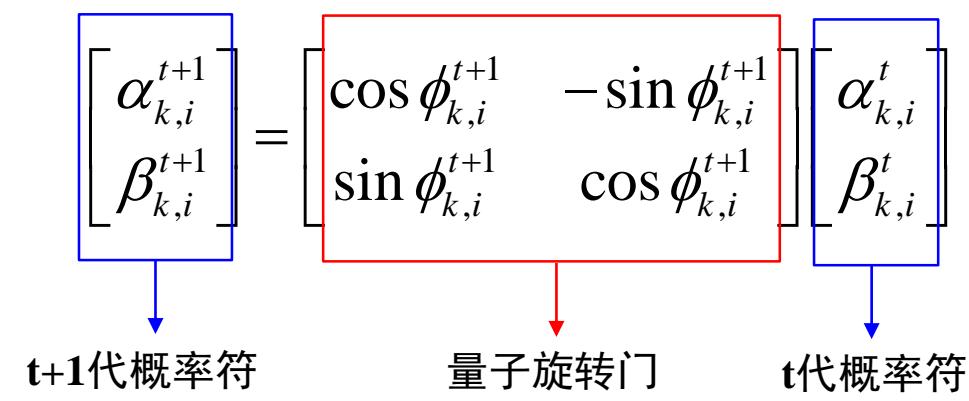
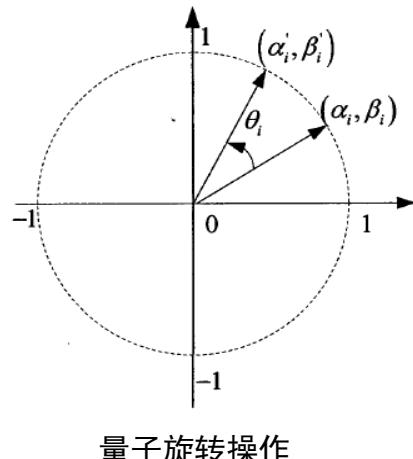
# 基于量子遗传算法的预编码联合优化

## ● 离散优化：量子遗传算法 (Quantum Genetic Algorithm)

- 对被优化函数的解空间进行量子态编码，生成种群，进化多代
- 对相位单元  $\theta_m$  进行量子编码  $\Psi_{k,m} = \alpha_{k,m} |0\rangle + \beta_{k,m} |\pi\rangle$ ，得到

$$\Psi = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \dots & \alpha_{K,M} \\ \beta_{1,1} & \beta_{1,2} & \dots & \beta_{K,M} \end{bmatrix}^T \begin{vmatrix} 0 \\ \pi \end{vmatrix}$$

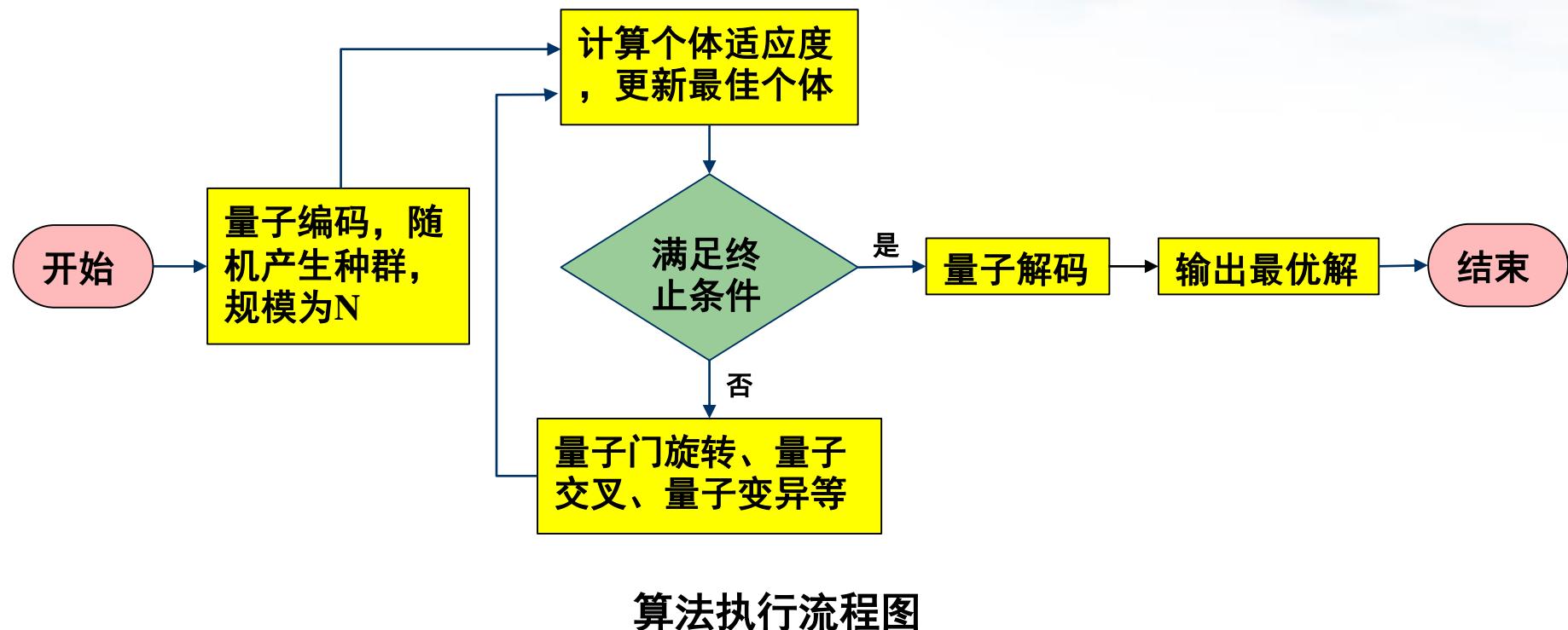
- 观测，确定进化方向后，进行迭代进化，进化方式包括：量子交叉、量子变异、量子大灾变及量子旋转门：



# 基于量子遗传算法的预编码联合优化

## ● 离散优化：量子遗传算法（Quantum Genetic Algorithm）

- 再次观测进化后的种群，更新**最优个体**
- 利用**最优个体**确定进化方向，进入**迭代**



# 基于量子遗传算法的预编码联合优化

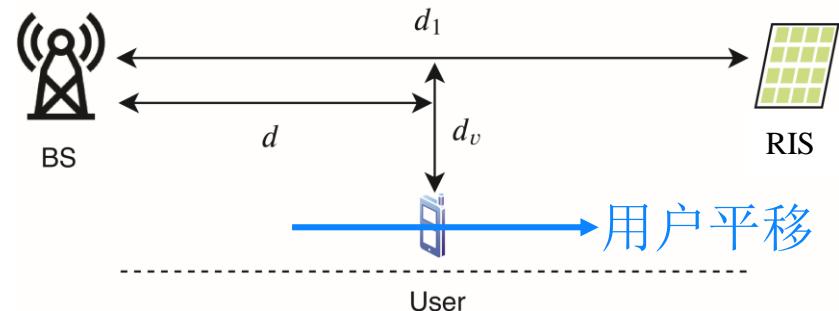
## ● 算法设计

- **解决方案：**迭代求解  $\Phi, w$
- **解决思路：**对  $\Phi$  进行量子态编码，进化若干代得到最优个体

### 基于量子遗传算法（QGA）的联合预编码

1. 给定初始波束预编码矩阵  $w$
2. 对  $\Phi$  进行量子态编码
3. 随机生成若干量子态个体
4. 寻找最优个体，确定进化方向
5. 对其余个体进行量子旋转、交叉变异、大灾变等操作
6.  $\Phi$  收敛则继续，否则返回3.
7. 得到给定  $w$  的最优  $\Phi$
8. 给定  $\Phi$ ，利用偏导数求解  $w$
9.  $\Phi w$  均收敛则继续，否则返回3.
10. 得到优化后的联合预编码结果

### 仿真场景：单RIS单天线用户场景



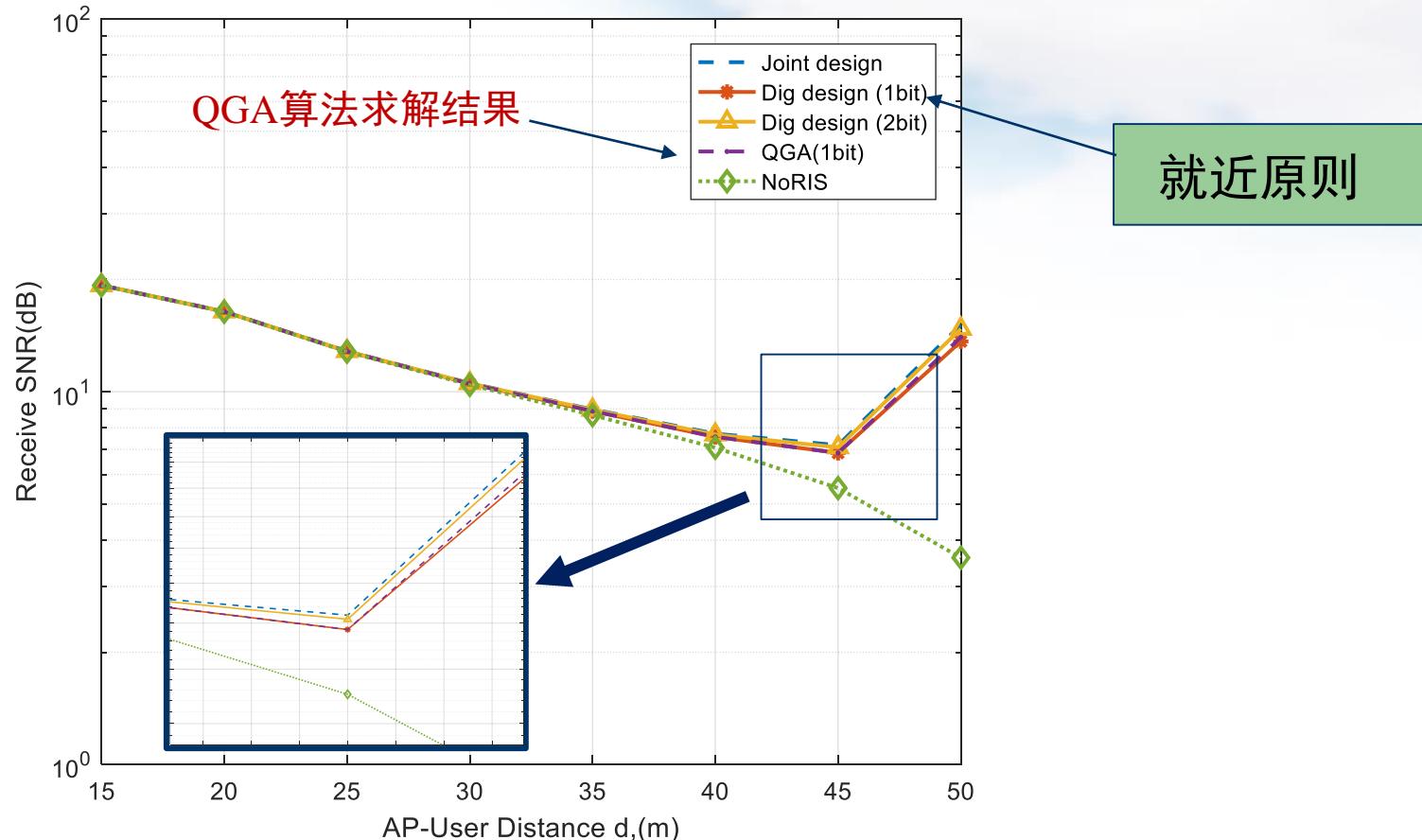
$$d_1 = 51m \quad d_v = 0.3m$$

反射阵单元数：50  
基站天线数：32

[Wang'19] P. Wang, J. Fang, X. Yuan, Z. Chen, H. Duan, and H. Li, "Intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave communications: Joint active and passive precoding design," arXiv preprint arXiv:1908.10734, Aug. 2019.

# 量子遗传算法(Quantum Genetic Algorithm)

## ● 性能对比



量子遗传算法（QGA）能够搜到更优解

# 基于量子遗传算法的预编码联合优化

## ● 复杂度对比

- 算法优势：收敛快，**低复杂度**，泛用性强

优化算法	计算复杂度	实现方法
NPP	$O(N^6)$	并行
ICU	$O(N^2)$	串行
ADMM	$O(N^3)$	并行
QGA	$O(MN)$	并行

量子遗传算法能够显著降低优化复杂度

# 报告提纲

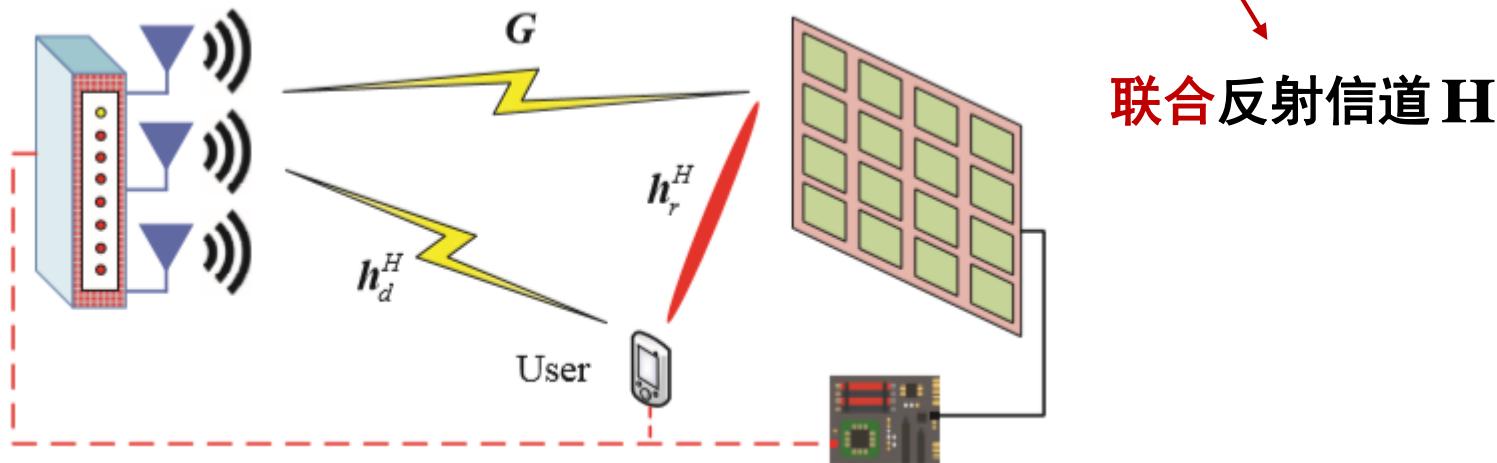
- 1 RIS基本原理
- 2 RIS预编码设计
- 3 RIS信道估计
- 4 RIS天线设计
- 5 RIS硬件平台
- 6 挑战与机遇

# RIS信道估计

- 为进行联合预编码，基站需要获取**完整**的信道状态信息
- RIS全部由**无源**器件组成，**反射**信道**难以单独**获取

$$y = \left[ \mathbf{h}_d^H + \left( \mathbf{h}_r^H \text{diag}(\varphi) \mathbf{G} \right) \right] \mathbf{x} + w$$

$$\mathbf{h}_r^H \text{diag}(\varphi) \mathbf{G} = \varphi \text{diag}(\mathbf{h}_r^H) \mathbf{G}$$

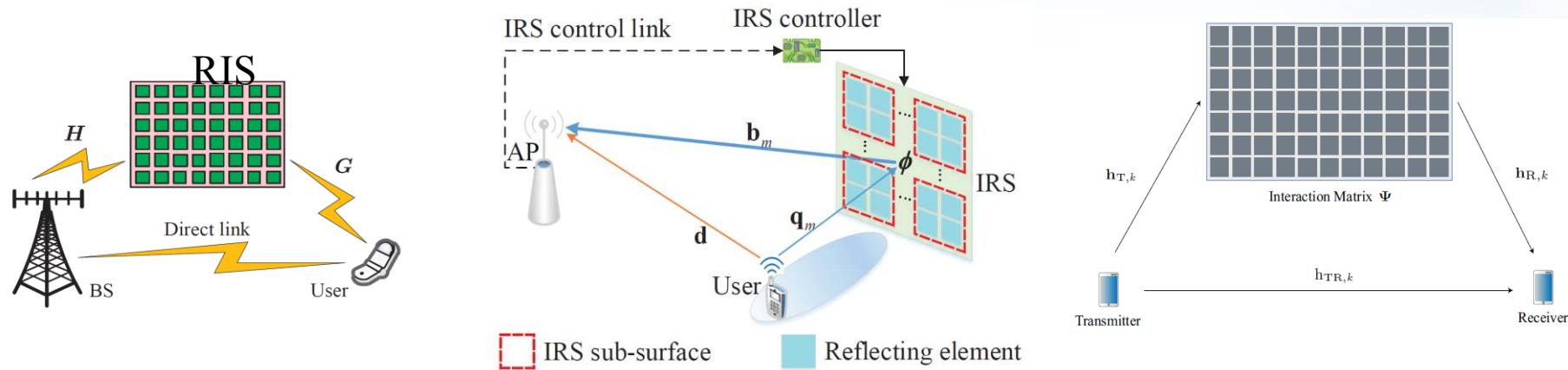


联合反射信道  $\mathbf{H}$

信道维度过高，导频开销**巨大**

# 现有的RIS信道估计方法

- 开关模式：逐个切换RIS单元开关状态，分步完成 [Nadeem' 19]
- 分组模式：通过将RIS划分为多个子组，降低导频开销 [Zheng' 19]
- 基于机器学习的联合估计与RIS预编码 [Taha'19]



[Nadeem' 19] Q. Nadeem, A. Kammoun, A. Chaaban, M. Debbah, M. Alouini, “Intelligent Reflecting Surface Assisted Multi-User MISO Communication,” arXiv preprint arXiv: 1906.02360v1, Jun. 2019.

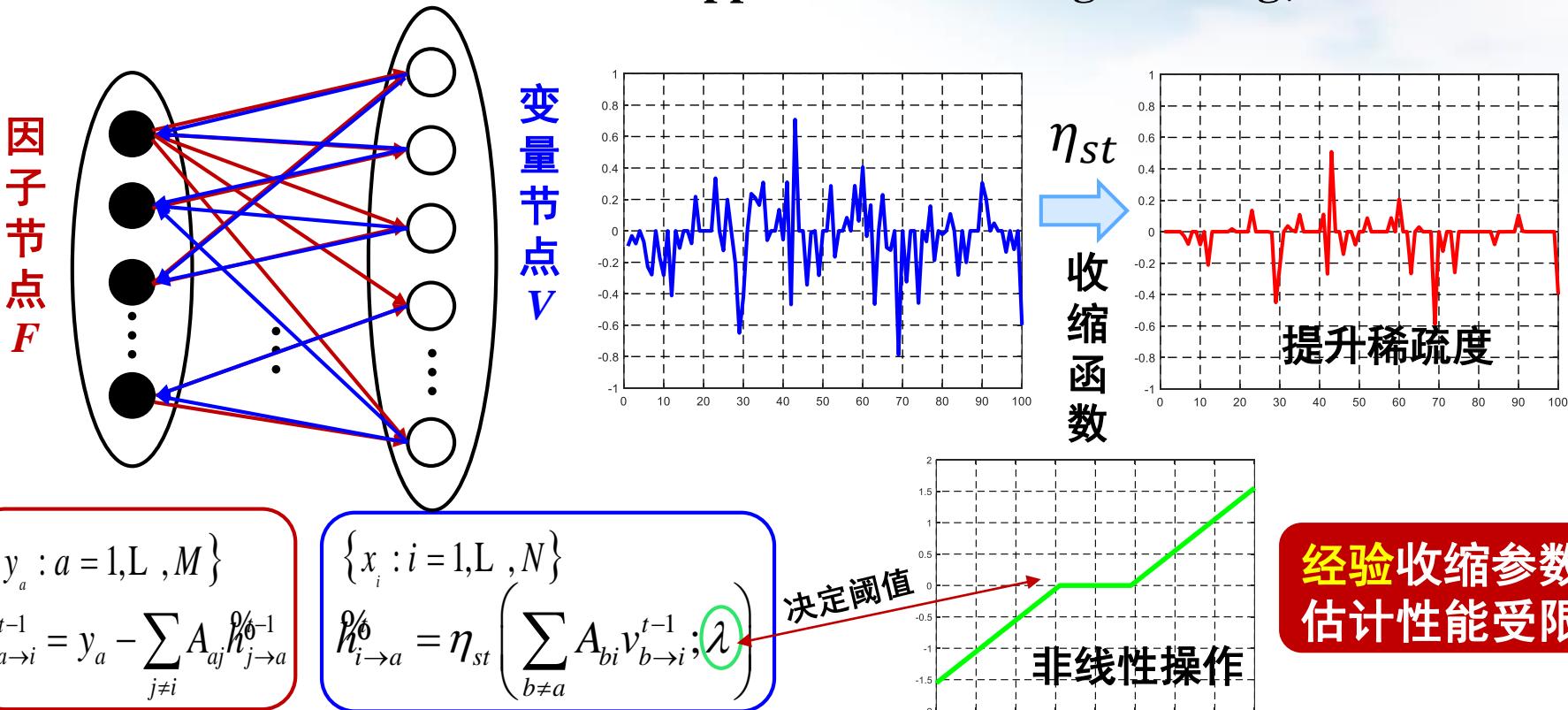
[Zheng' 19] B. Zheng and R. Zhang, “Intelligent Reflecting Surface-Enhanced OFDM: Channel Estimation and Reflection Optimization,” arXiv preprint arXiv: 1909.03272v1, Sep. 2019.

[Taha'19] A. Taha, M. Alrabeiah and A. Alkhateeb, “Enabling Large Intelligent Surfaces with Compressive Sensing and Deep Learning,” arXiv preprint arXiv: 1904.10136v2, Apr. 2019.

# 基于GM-LAMP的RIS反射信道估计

## ● RIS反射信道估计

- 信道角度域稀疏：可建模为稀疏信号恢复问题  $y = \text{Avec}(\tilde{\mathbf{H}}) = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{h}}$
- 求解方法：近似消息传递（Approximate Message Passing, AMP）

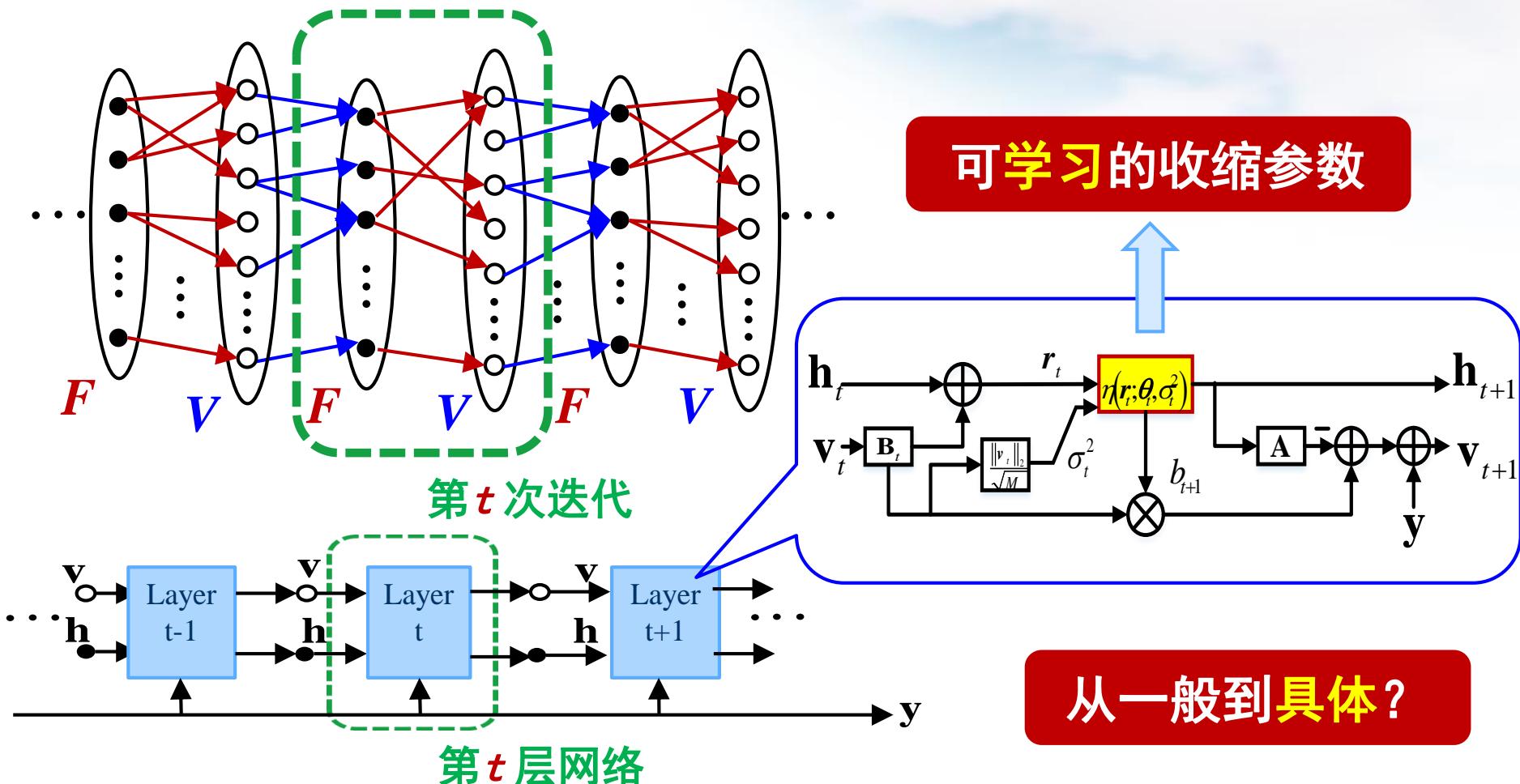


[Donoho'10] D. L. Donoho, A. Maleki, and A. Montanari, "Message passing algorithms for compressed sensing: I. motivation and construction," in Proc. ITW, Cairo, Egypt, Jan. 2010.

# 基于GM-LAMP的RIS反射信道估计

## ● 主要思路

- LAMP: 将AMP展开为深度神经网络，一层网络对应一次迭代



# 基于GM-LAMP的RIS反射信道估计

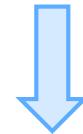
## ● 创新思路

- 稀疏信道模型：混合高斯（Gaussian Mixture, GM），得到新收缩函数
- 可学习的收缩函数：将混合高斯收缩函数替代原收缩函数

一般收缩函数

参数

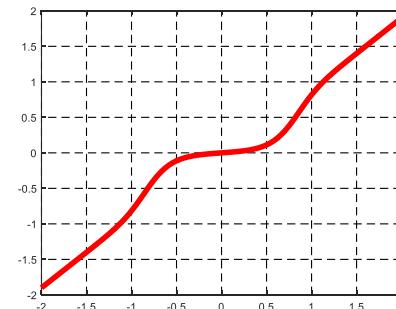
$$\eta_{st}(r; \lambda, \sigma^2) = \max(|r| - \lambda\sigma, 0) e^{j\omega}$$



混合高斯  
收缩函数

模型+参数

$$\eta_{gm}(r; \theta, \sigma^2) = \frac{\sum_{l=0}^L p_l \phi(r) CN\left(r; 0, \sigma^2 + \sigma_l^2\right)}{\sum_{l=0}^L p_l CN\left(r; 0, \sigma^2 + \sigma_l^2\right)}$$



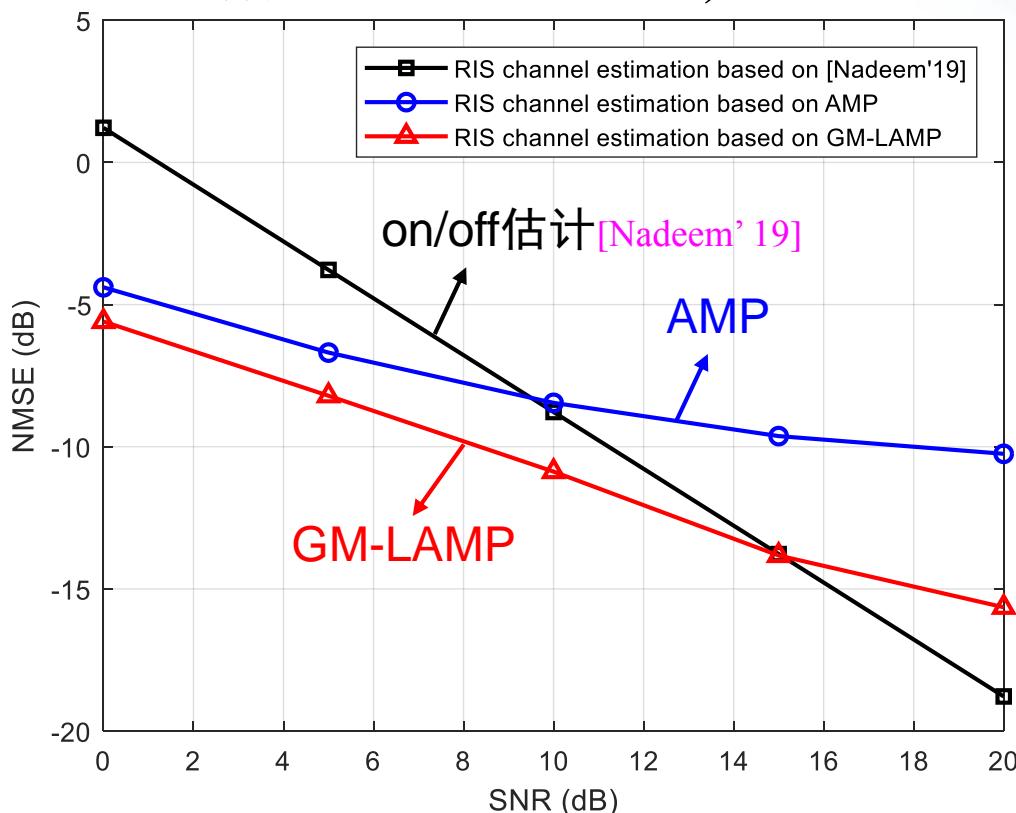
[Schniter'17] M. Borgerding, P. Schniter, and S. Rangan, "AMP-inspired deep networks for sparse linear inverse problems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 16, pp. 4293–4307, Aug. 2017.

# 基于GM-LAMP的RIS反射信道估计

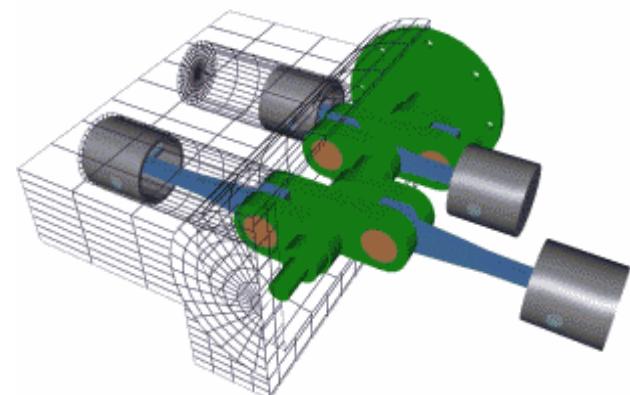
## ● 仿真结果

- 单元数目—BS:  $N=32$ , RIS:  $M=8*8$ , UE:  $K=1$
- 路径数目—BS-RIS:  $L_1=3$ , RIS-UE:  $L_2=10$

网络层数  $T=8$



既能降低导频开销  
又能提高估计性能



[Nadeem' 19] Q. Nadeem, A. Kammoun, A. Chaaban, M. Debbah, M. Alouini, "Intelligent Reflecting Surface Assisted Multi-User MISO Communication," arXiv preprint arXiv: 1906.02360v1, 2019.

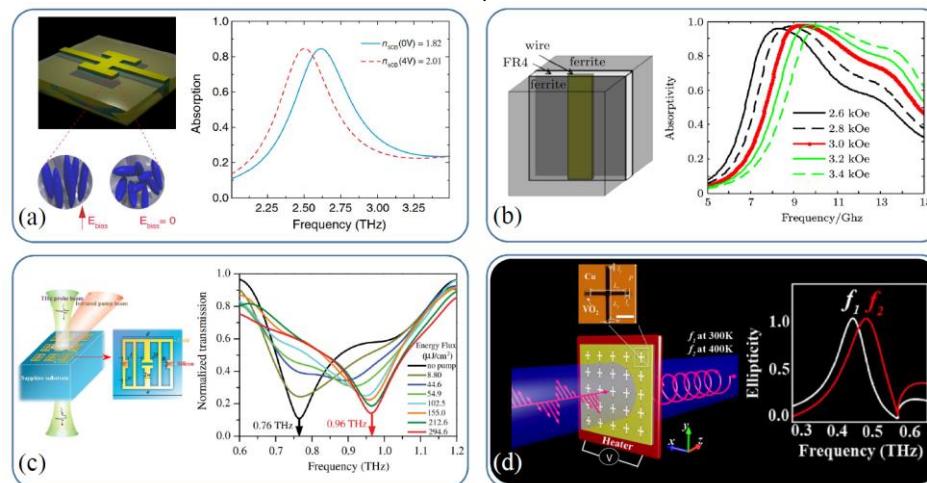
# 报告提纲

- 1 RIS基本原理
- 2 RIS预编码设计
- 3 RIS信道估计
- 4 RIS天线设计
- 5 RIS硬件平台
- 6 挑战与机遇

# 基于超材料的智能表面

## ● 超表面材料

- 具有亚波长结构的人工平面材料，可以响应外界激励
- **电敏**: 液晶，石墨烯-金属混合材料等
- **磁敏**: 自适应微孔阵列，可调谐超材料等
- **光敏**: 半导体硅和砷化镓，基于开口谐振环的超材料等
- **温敏**: 二氧化钒等温控相变材料，不同热膨胀系数的合成材料等



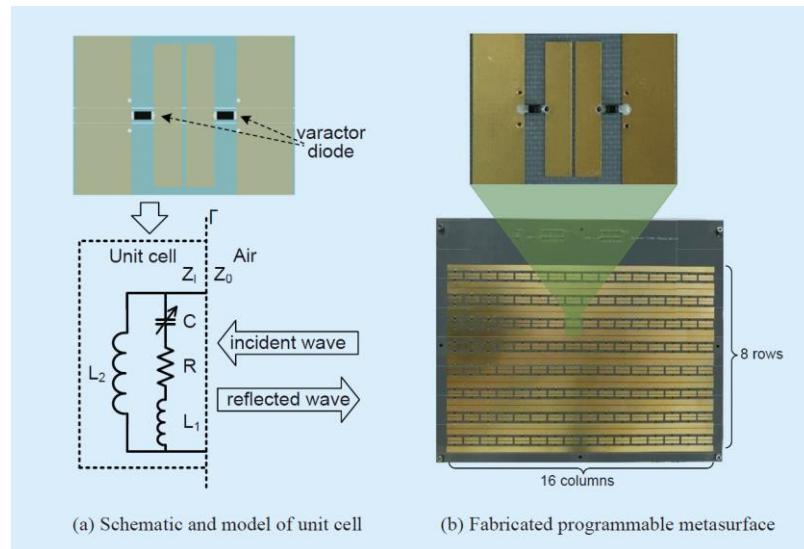
**重构无线传播环境：通过外部刺激实时调控入射电磁波相位**

[Liu'18] F. Liu, A. Pitilakis, M. S. Mirmoosa, et al., “Programmable Metasurfaces: State of the art and Prospects”, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Florence, Italy, May 2018.

# 基于可编程超表面的天线设计

## ● 可编程超表面的设计原理

- 基本单元：变容二极管桥接而成的四个金属矩形贴片
- 平行谐振腔：变容二极管+馈电网络
- 偏置电压→负载阻抗→反射系数→实现调相



$$Z_l = \frac{jwL_2 \left( jwL_1 + (jwC)^{-1} + R \right)}{jw(L_2 + L_1) + (jwC)^{-1} + R}.$$

$$\Gamma = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0}.$$

$$\varphi(\Gamma) = \arctan\left(\frac{\text{Im}(\Gamma)}{\text{Re}(\Gamma)}\right).$$

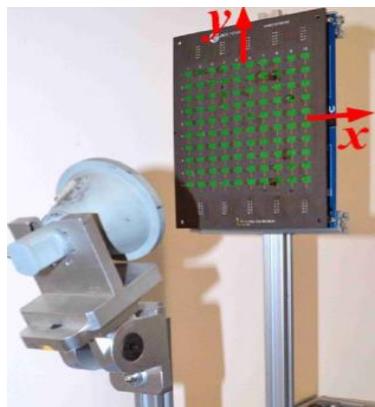
可编程超表面：低复杂度、低功耗

[Tang'19] W. Tang, X. Li, J. Dai, S. Jin, Y. Zeng, Q. Cheng, and T. Cui, "Wireless Communications with Programmable Metasurface: Transceiver Design and Experimental Results," China Commun., vol. 16, no. 5, pp. 46–61, May. 2019.

# 基于电磁界面的智能表面

## ● 基本原理

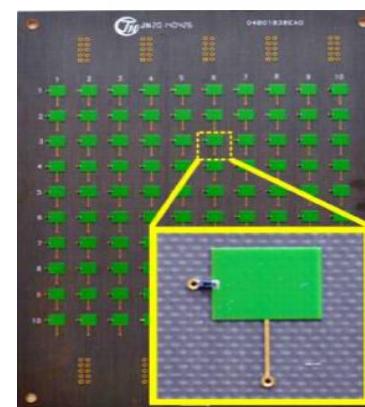
- 结构简单：集成“移相”与“辐射”于一体
- 成本低：利用低能耗PIN二极管实现1-bit电控调相
- 相移被低精度量化：以性能损失换取能耗与成本的降低



100天线



1600天线



低功耗设计思路：利用硬件规模，换取天线增益

[Yang'17] H. Yang, F. Yang, X. Cao, S. Xu, J. Gao, X. Chen, M. Li, and T. Li, “A 1600-element dual-frequency electronically reconfigurable reflectarray at X/Ku-band,” *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, vol. 65, no. 6, pp 3024-3032, Jun. 2017.

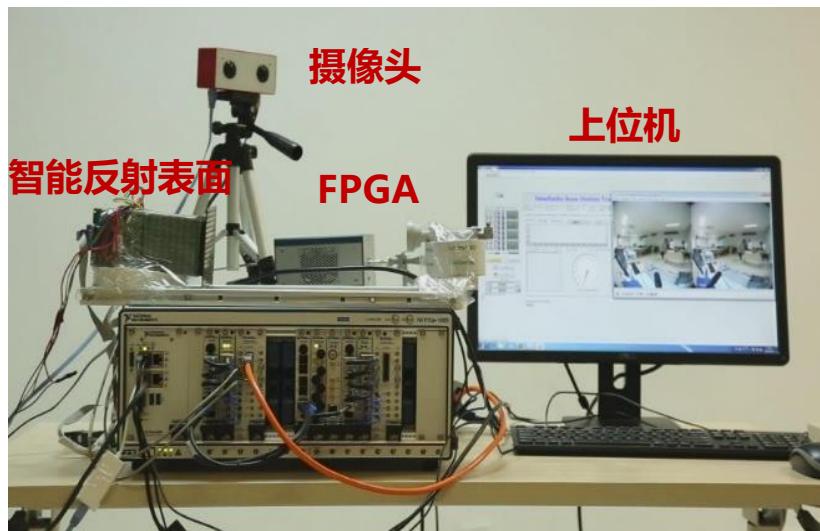
# 报告提纲

- 1 RIS基本原理
- 2 RIS预编码设计
- 3 RIS信道估计
- 4 RIS天线设计
- 5 RIS硬件平台
- 6 挑战与机遇

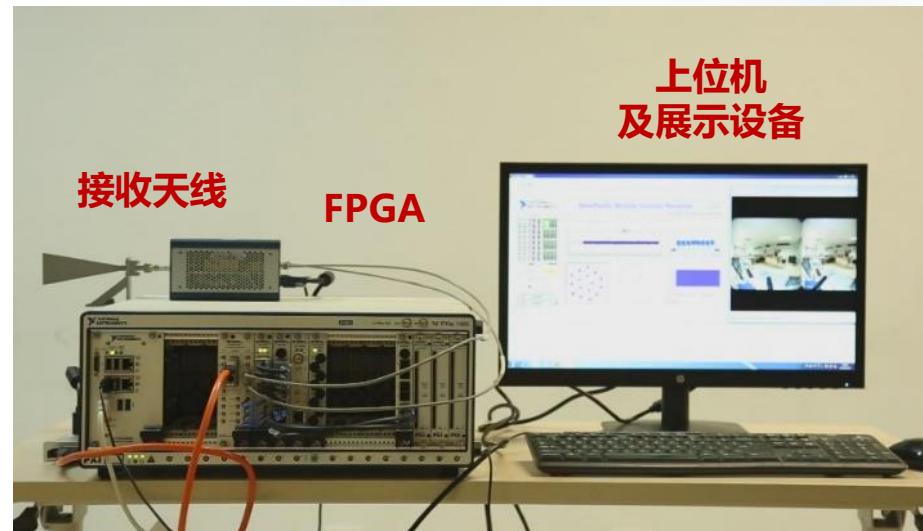
# 基于智能反射表面的原型机验证

- 基于智能反射表面的无线通信平台

- 系统由基站与用户组成
- 基站配备智能表面进行定向波束发射



基站端：  
摄像头、上位机、FPGA、智能反射表面

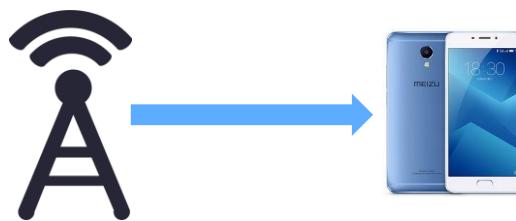
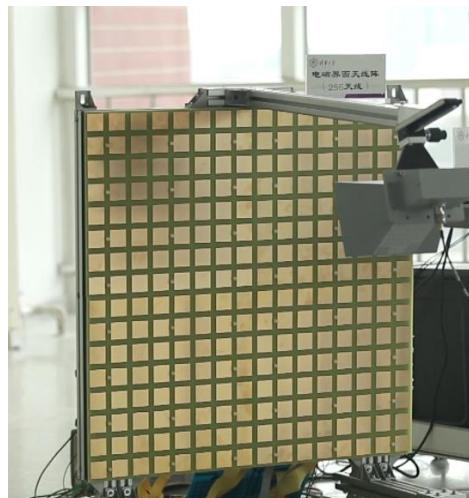


用户端：  
接收天线、FPGA、上位机及展示设备

# 基于智能反射表面的原型机验证

- 基于智能反射表面的无线通信平台

- 载波频率**2.3GHz**, 反射表面天线数256
- 端到端的无线传输系统

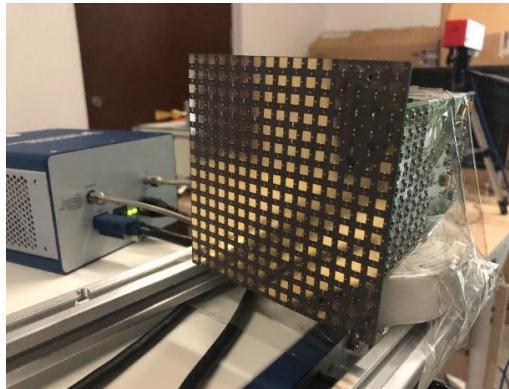


基于智能反射表面的低频段  
无线通信系统原型机（**视频演示**）

# 基于智能反射表面的原型机验证

## ● 扩展至毫米波28GHz

- 载波频率**28GHz**, 反射表面天线数256
- 基站**服务多用户的无线传输系统**



基于智能反射表面的毫米波频段  
无线通信系统原型机（**视频演示**）

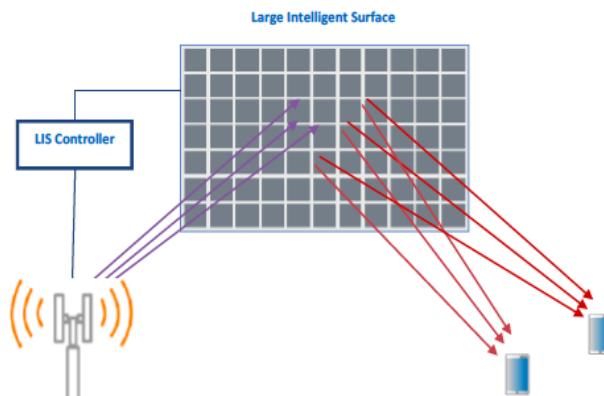
# RIS与其他应用结合1

## ● RIS与6G结合

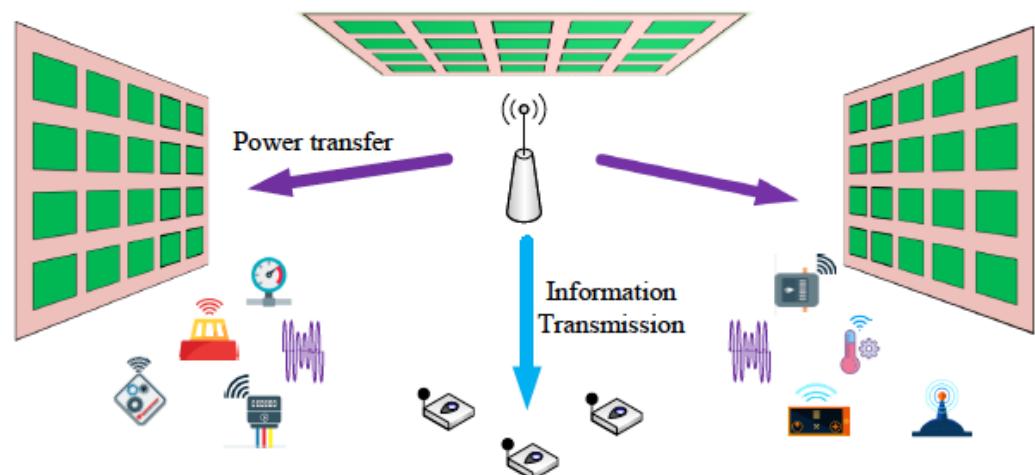
- 2019年11月3日，科技部在北京召开了6G技术研发工作启动会
- 新需求带来更具挑战性的问题，需要在物理层采用全新的通信模式

## ● RIS与无线携能通信（SWIPT）结合

- 补偿长距离引起的路损



在6G中使用RIS



RIS与SWIPT结合

[Yuan'19] Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, S. Parolari, "Potential key technologies for 6G mobile communications," arXiv preprint arXiv: 1910.00730, 2019.

[Wu'19] Q. Wu, R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network," arXiv preprint arXiv: 1905.00152, 2019.

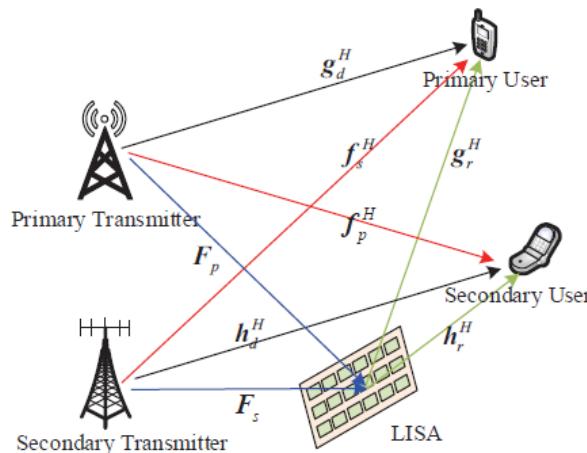
# RIS与其他应用结合2

## ● RIS与NOMA结合

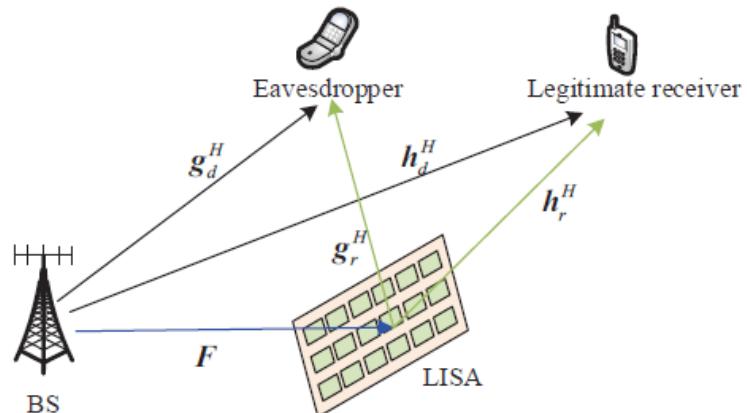
- 构建差异性更强的信道，提高NOMA性能增益

## ● RIS辅助保密通信

- 发射端的波束赋型和RIS的相位联合优化来提高通信的保密性
- 经济又节能



### RIS与NOMA结合



### RIS辅助保密通信

[Yang'19] G. Yang, X. Xu, Y. Liang, "Intelligent reflecting surface assisted non-orthogonal multiple access," arXiv preprint arXiv: 1907.03133, 2019.

[Yu'19] X. Yu, D. Xu, R. Schober, "Enabling secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces," arXiv preprint arXiv: 1904.09573, 2019.

# 报告提纲

- 1 RIS基本原理
- 2 RIS预编码设计
- 3 RIS信道估计
- 4 RIS天线设计
- 5 RIS硬件平台
- 6 挑战与机遇

# 机遇与挑战

## ● 理论研究

- 电磁学理论模型：精确、简洁
- 信息与通信理论：**容量、信道模型**
- 性能分析：不同场景下的增益

## ● 算法设计

- 波束赋形：联合优化
- 信道信息获取：**降低开销**
- 数据驱动系统优化：机器学习

## ● 系统实现

- 信道测量
- RIS阵列设计：低成本、高增益
- **搭建测试平台**

# 改变信道

## ● 改变环境，适应自己

➤ 英国剧作家萧伯纳：“一个理智的人应该改变自己去适应环境，只有那些不理智的人，才会想去改变环境适应自己。但历史是后一种人创造的”

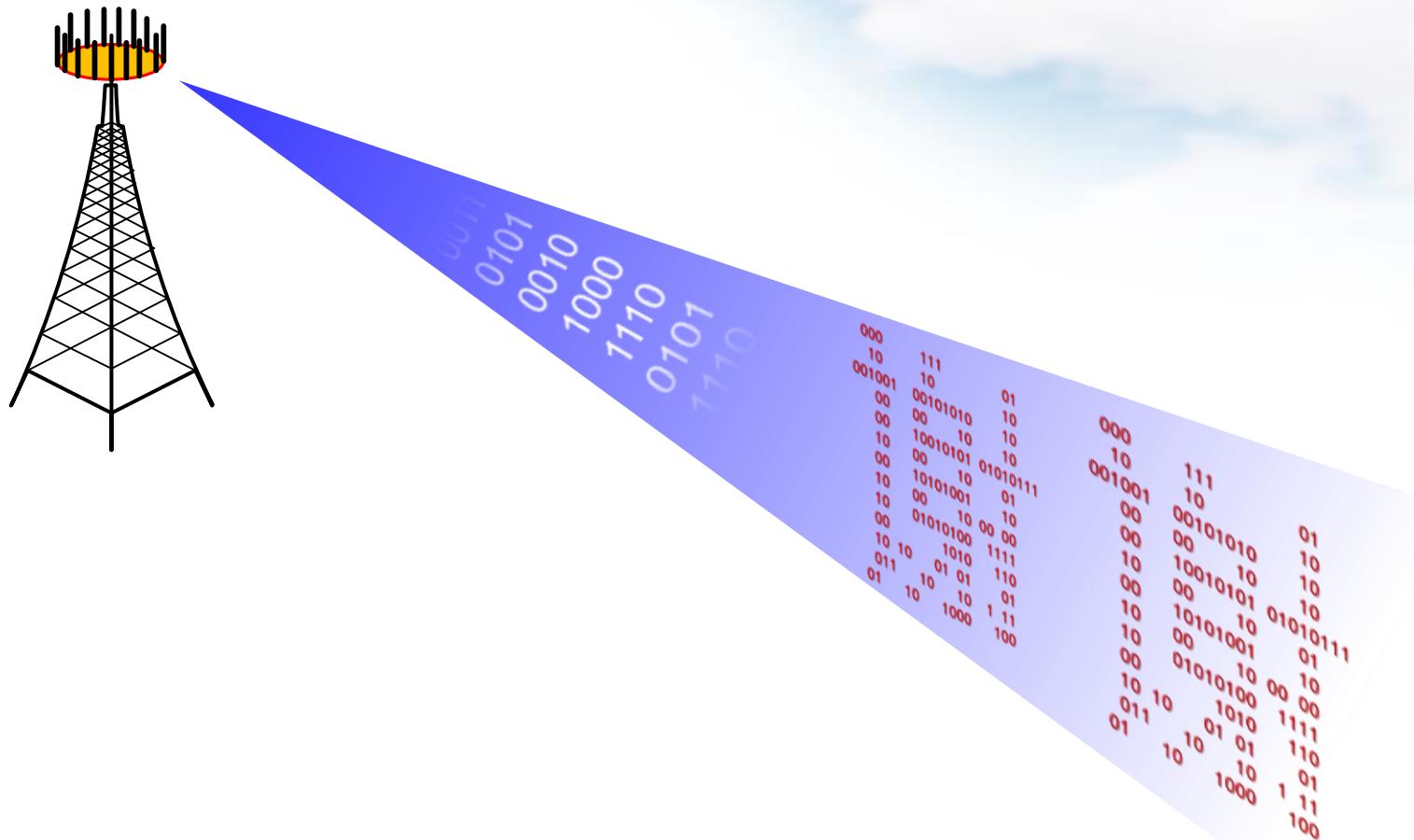


RIS智能调控无线传播环境，可以“改变信道”





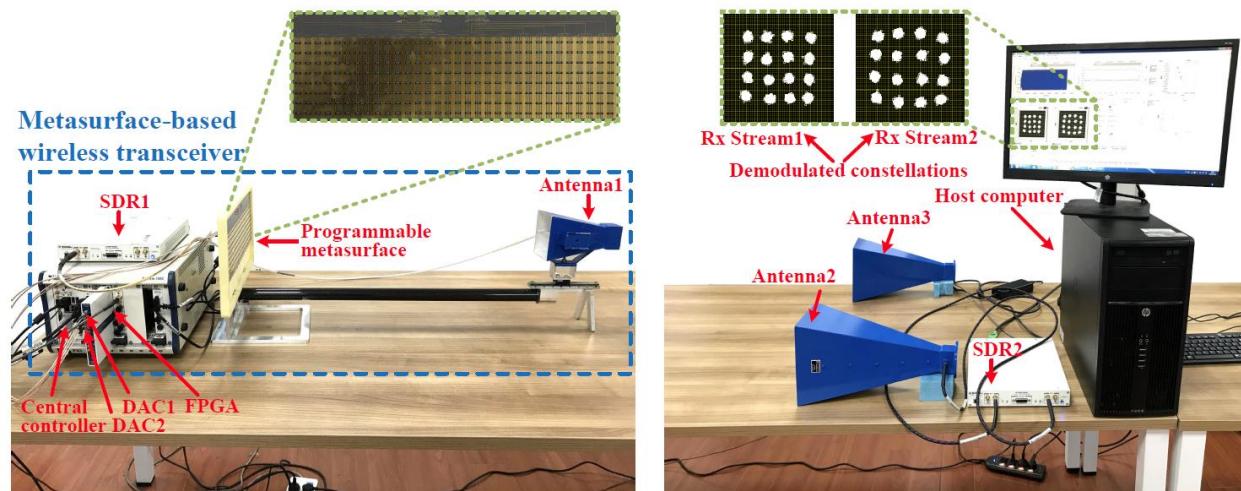
# 学术报告：可重构智能表面



# (备份) 基于可编程超表面的发射机

## ● 可编程超表面

- 数字基带序列 → 可编程超表面的控制信号序列
- 馈电天线：将载波信号馈电到辐射源，实现载波调制
- 数模转换器：产生多通道信号
- 通过不同的控制信号实现调相



射频无链范式：低成本、低功耗和高能效

[Tang'19] W. Tang, M. Chen, J. Dai, Y. Zeng, X. Zhao, S. Jin, Q. Cheng, and T. Cui, “Wireless communications with programmable metasurface: New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design”, *IEEE Wireless Commun.*, Available: arXiv:1907.01956.