

# 智能超表面 (RIS) 实用化的一些考虑

袁弋非

2023-8-30

## □ 部署场景和信道模型

## □ 技术分析

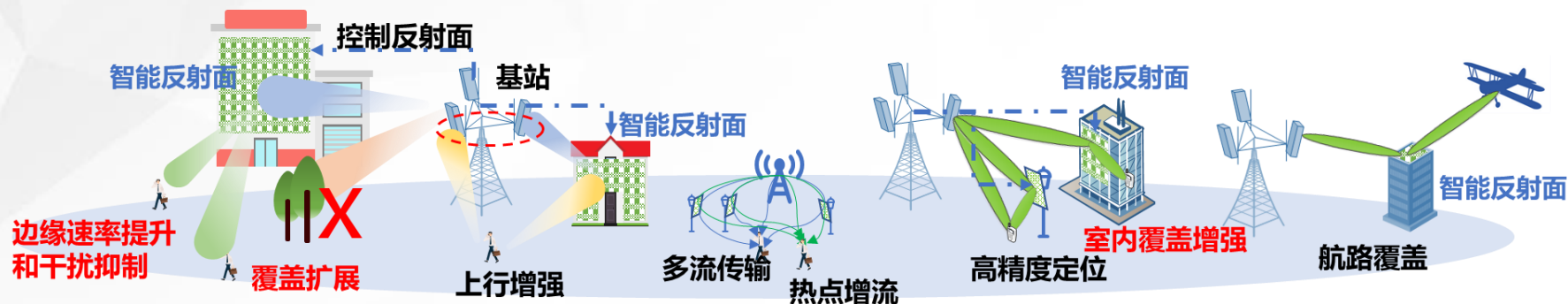
- 超材料器件的调控
- 空口控制信令
- 基于RIS的基站
- 标准化策略

## □ 部分进展

- 超材料器件
- 系统仿真
- 现网测试

**解决问题** 扩大网络覆盖、提升小区容量、抑制用户干扰、部署灵活低碳

**应用场景** 小区边缘覆盖提升, 小区容量增强, 上行增强, 室内覆盖增强, 高精度定位, 低空航路覆盖



## IMT-2030测试场景 (2022) : 覆盖增强

	室内覆盖		室外覆盖		
	室内L型走廊	室内开放办公区	室外覆盖	室外多用户	用户级波束赋型
清华	√				
联通+清华	√	√			
移动+东南	√	√	√	√	
中兴	√	√	√	√	√

## 广东移动测试场景: 覆盖增强



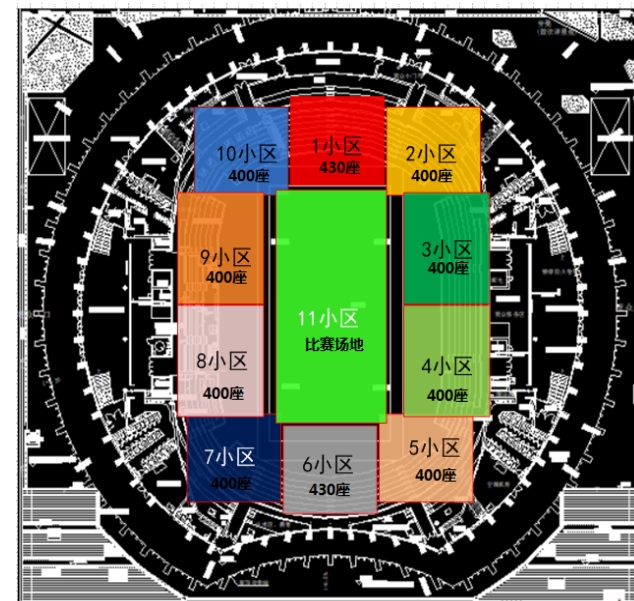
Case1: 隧道或停车场。用户少投资收益低。面积大且比较封闭, 宏站信号很难进入, 但考虑安全性, 设备部署困难



Case2: 室内场景。室分部署困难, 用户网络需求度高



Case3: 道路。室外空旷, 周边多个信号重叠直射, 干扰强质量差



**杭州亚运试点计划: 潮汐效应区域, 忙时扩充容量, 闲时保证基本覆盖**

场馆11扇区, 无比赛时网络流量低, 直接关断基站影响基础运行, 考虑用RIS反射信号保证覆盖

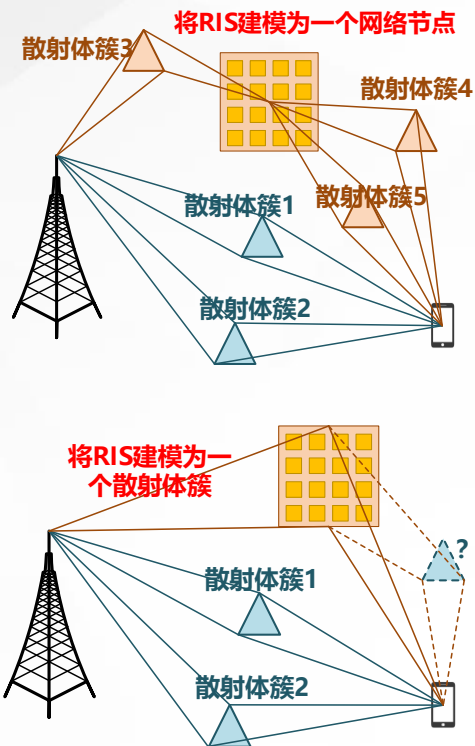
## 测量频点

- 4GHz 或 6GHz
- 毫米波 (TBD)

## 测量数据

- 路径损耗：直连和级联两条信道路损的关系
- 时延、角度、功率的分布
- 其他方法：基于ray tracing，替代或者补充实测数据

## 建模方法



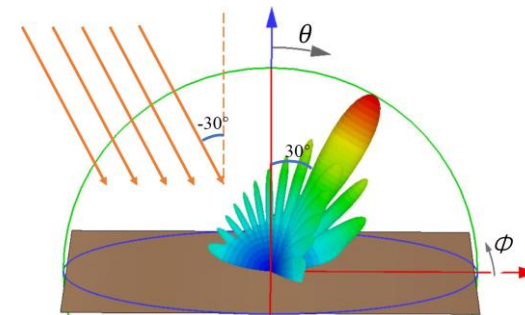
方案	优势	劣势
<p>Option 1: RIS面板确定性建模, BS-RIS与RIS-UE两跳链路单独建模</p> <p>Option 1a: 两段信道基于38.901分别建模, 按照一定准则删掉一些径</p> <p>Option 1b: 增加一个RIS径, 对于其他径的影响 (TBD), 例如建模一个RIS径, 其他22条按照随机模型建模</p>	<p>参照38.901模型, 两跳链路的小尺度信道公式容易表达</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 占用内存巨大, 运行速度慢。</li> <li>• 缺少理论或实测支撑, 不确定该模型是否符合实际</li> </ul> <p>两种方案小尺度建模涉及代码架构的修改, 如何与原有架构融合有待研究</p>
<p>Option 2: 将RIS建模为一个散射体簇 (cluster) 加入原有BS-UE的建模</p>	<p>基于现有平台, 不会大幅增加运行内存和速度</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 如何表征RIS散射体? 需明确RIS散射体簇与传统簇是否有区别?</li> <li>• 当RIS-UE为NLOS, 如何建模? 将RIS建模为两跳簇?</li> </ul>

## 兼容和近场

- 确保在3GPP框架下, 尽可能复用建模方法和模块, 降低讨论和建模的开销
- 近场特性可以单独的考虑

## RIS天线模型的建模

RIS作为反射器件，理想建模情形下，其反射方向图应符合**镜面反射特性**，即在给定某入射角度 $\theta$ 的情况下，反射方向图应在对称角度 $-\theta$ 时有最大增益



## RIS的信道建模

在**远场条件**下，以38.901模型为基础，引入BS-RIS和RIS-UE两段链路的大尺度信道建模，计算接收信号功率

- 接收信号功率与BS-RIS、RIS-UE两段链路的路损、阴影衰落和天线增益相关
- 考虑RIS面板不同反射单元引起的相位差

$$P_{RIS_l} = PL_{BS-RIS_l} \cdot PL_{RIS_l-UE} \cdot SF_{BS-RIS_l} \cdot SF_{RIS_l-UE} \sum_{u=1}^U \left| \sum_{k=1}^K \alpha_{2,l,k}^{far} \cdot e^{j\Phi_{l,k}} \cdot \alpha_{1,l,k}^{far} \right|^2 \cdot \frac{TX_{power}}{U}$$

$$\alpha_{1,l,k}^{far} = \underbrace{\begin{bmatrix} F_{\theta}(\theta_{ZO_{ARIS}}, \varphi_{AO_{ARIS}}) \\ F_{\varphi}(\theta_{ZO_{ARIS}}, \varphi_{AO_{ARIS}}) \end{bmatrix}^T}_{\text{the pattern of RIS}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} F_{\theta}(\theta_{ZO_{D_{BS}}}, \varphi_{AO_{D_{BS}}}) \\ F_{\varphi}(\theta_{ZO_{D_{BS}}}, \varphi_{AO_{D_{BS}}}) \end{bmatrix}}_{\text{the pattern of antenna element of BS}} \cdot \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{ZO_{ARIS}, AO_{ARIS}}^T \cdot \bar{d}_{l,k}}{\lambda}\right) \rightarrow \text{RIS的入射波引起的相位差}$$

$$\alpha_{2,l,k,u}^{far} = \underbrace{\begin{bmatrix} F_{\theta}(\theta_{ZO_{AUE}}, \varphi_{AO_{AUE}}) \\ F_{\varphi}(\theta_{ZO_{AUE}}, \varphi_{AO_{AUE}}) \end{bmatrix}^T}_{\text{the pattern of antenna element of UE}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} F_{\theta}(\theta_{ZO_{D_{RIS}}}, \varphi_{AO_{D_{RIS}}}) \\ F_{\varphi}(\theta_{ZO_{D_{RIS}}}, \varphi_{AO_{D_{RIS}}}) \end{bmatrix}}_{\text{the pattern of RIS}} \cdot \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{ZO_{D_{RIS}}, AO_{D_{RIS}}}^T \cdot \bar{d}_{l,k}}{\lambda}\right) \rightarrow \text{RIS的出射波引起的相位差}$$

## □ 部署场景和信道模型

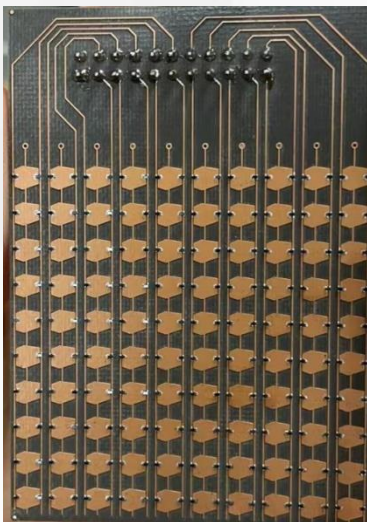
## □ 技术分析

- 超材料器件的调控
- 空口控制信令
- 基于RIS的基站
- 标准化策略

## □ 部分进展

- 超材料器件
- 系统仿真
- 现网测试

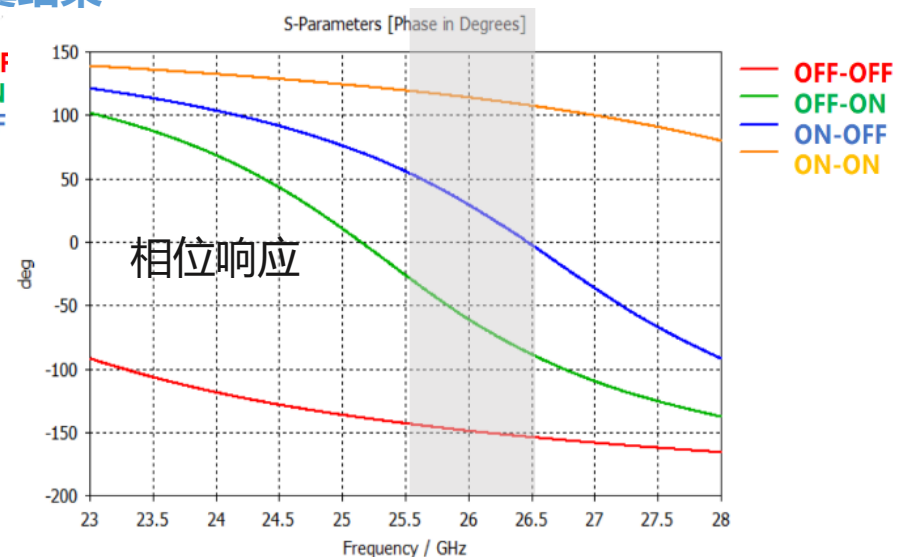
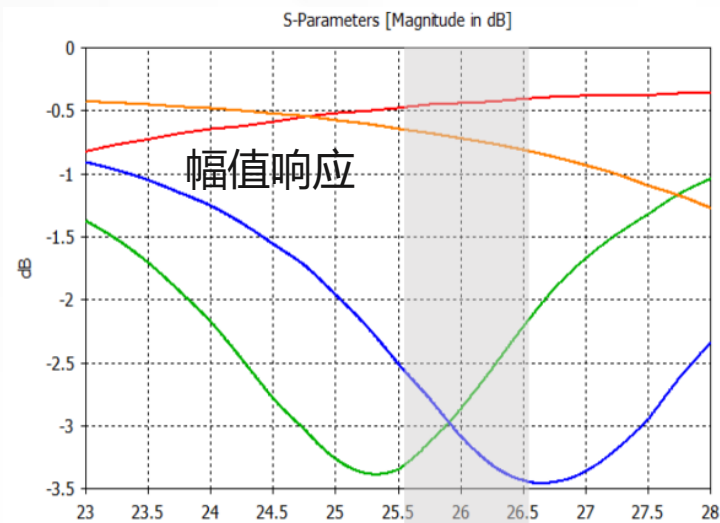
实际RIS器件



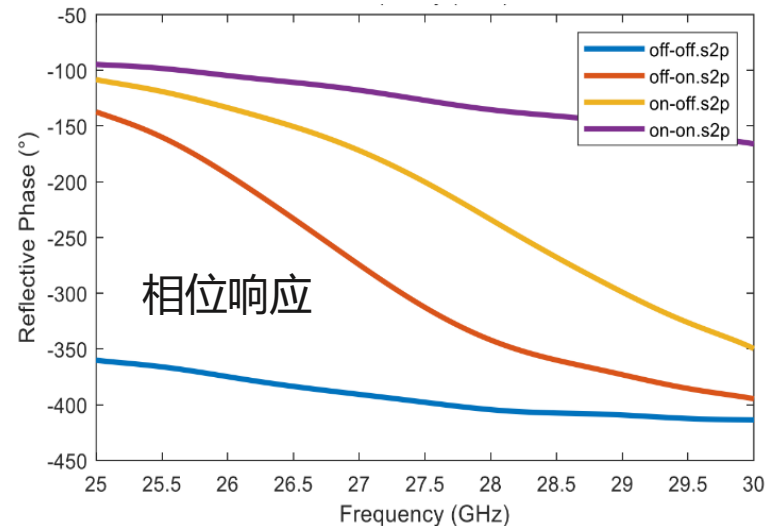
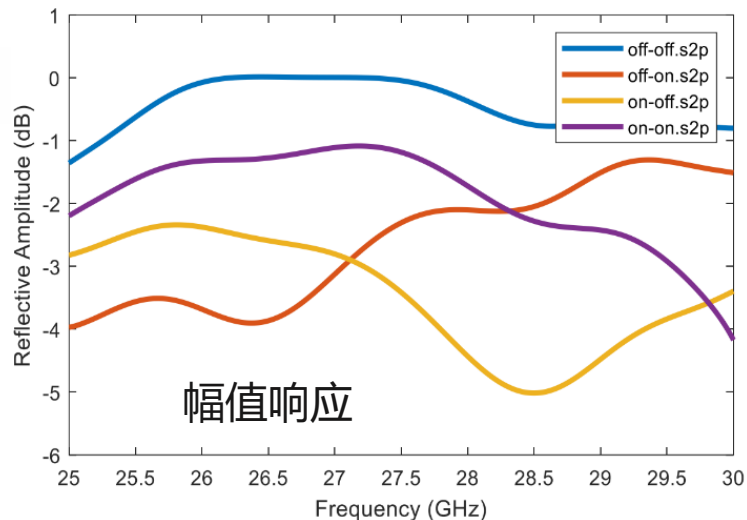
- 可调器件电磁建模的准确度、超表面材料的加工质量等因素会使得RIS器件的实测性能与仿真有较大差异

\* 与东南大学程强老师团队的联合研究

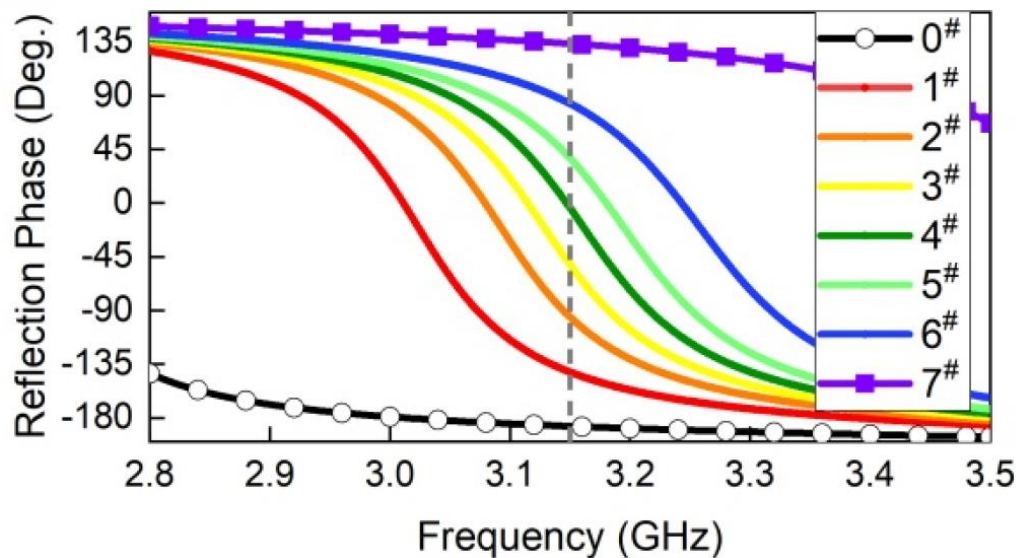
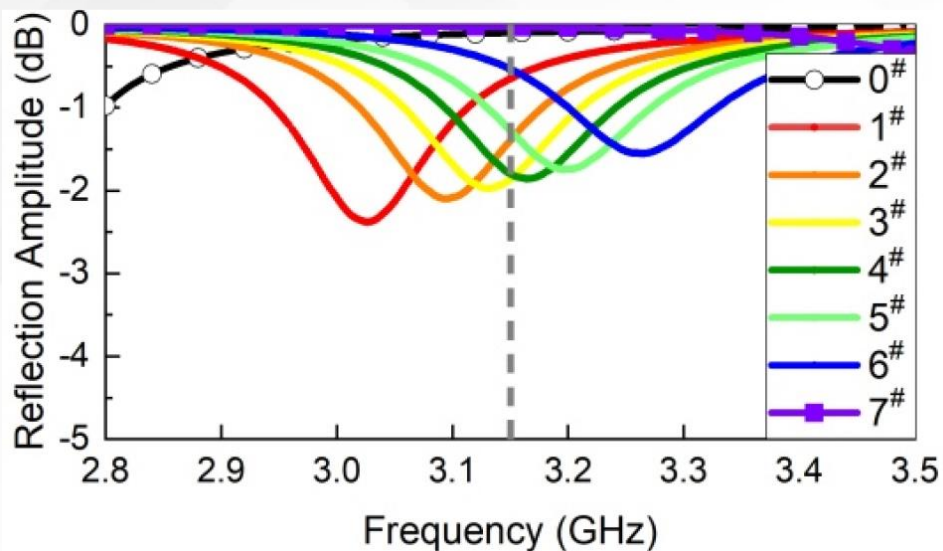
电磁仿真结果



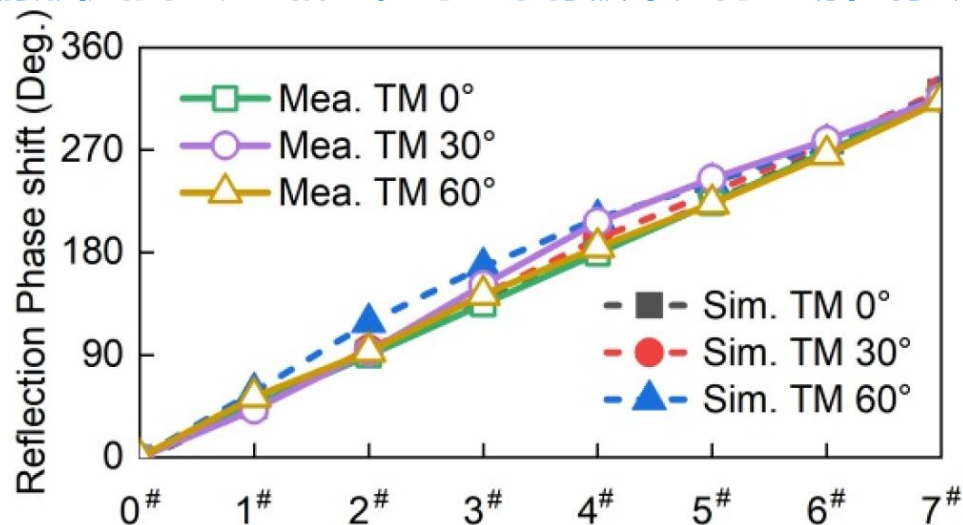
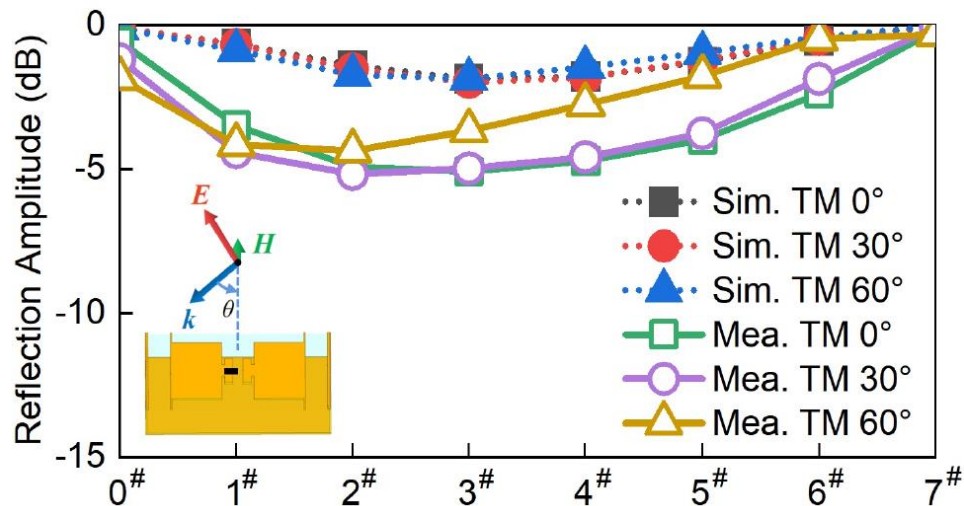
实测器件特性



8个相位状态，反射幅度均大约-2dB



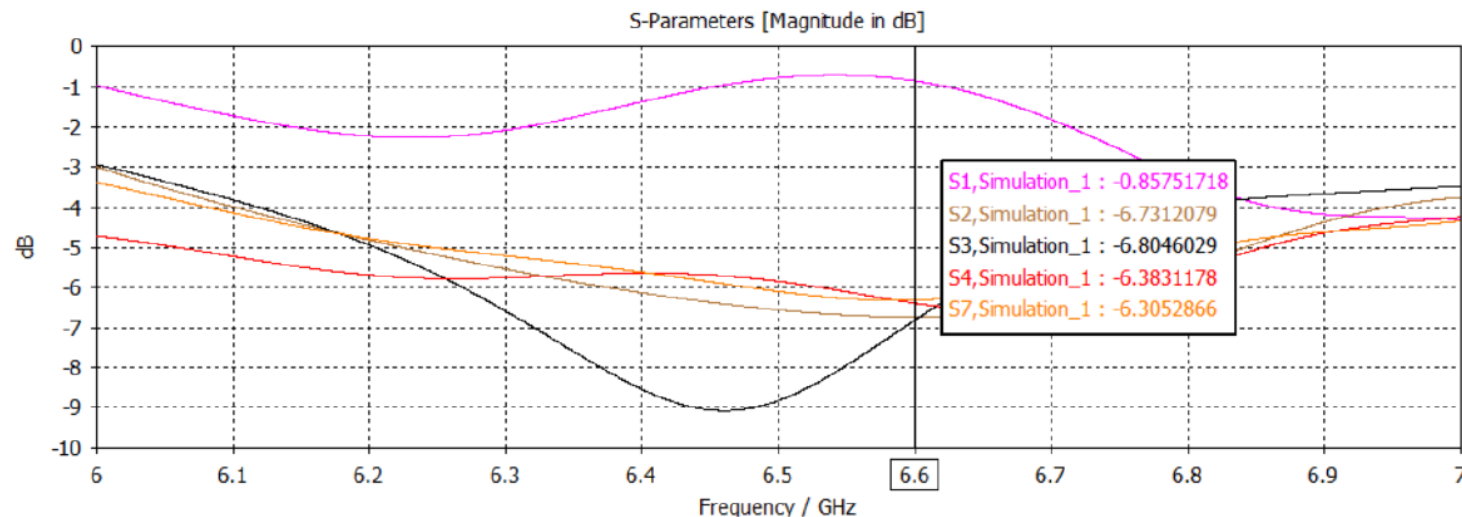
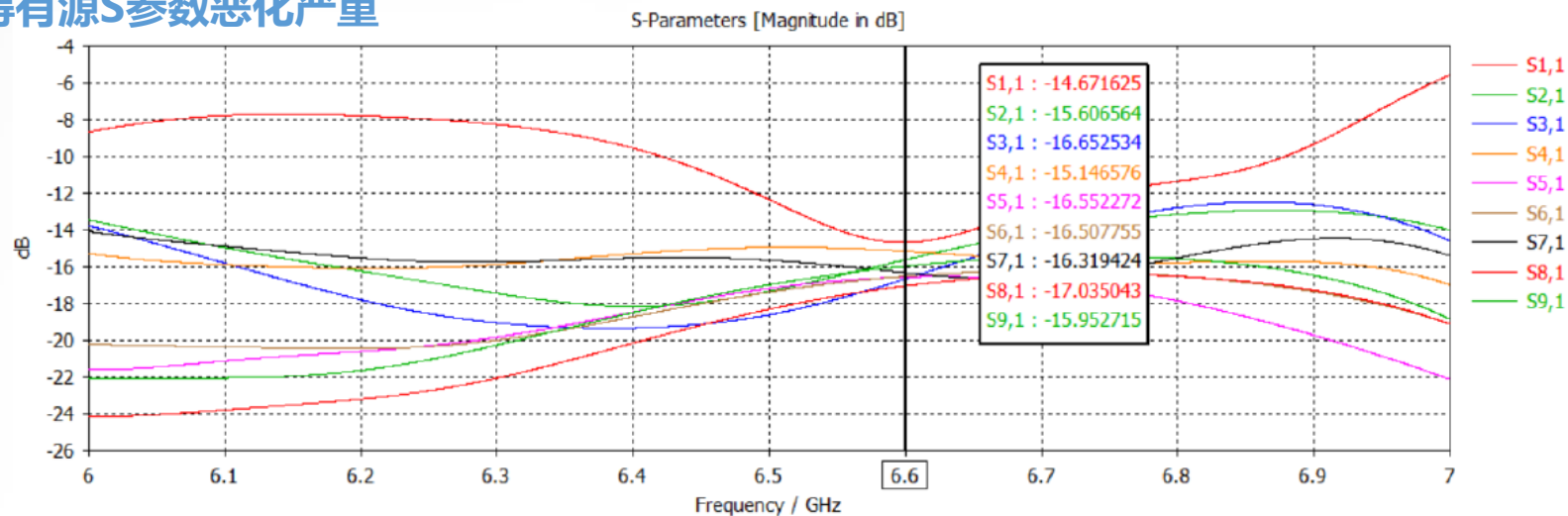
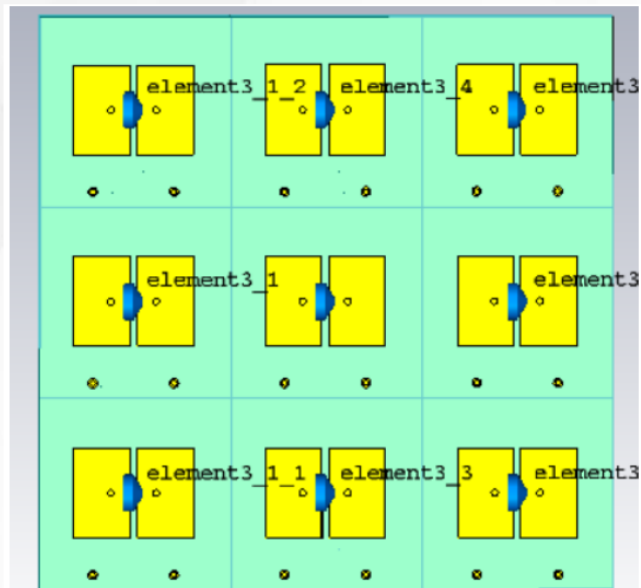
TM 0~60斜入射下，幅度相位基本稳定，但与理想情形仍存在明显偏差，对上下行波束方向互易性有影响



\* 与东南大学程强老师团队的联合研究

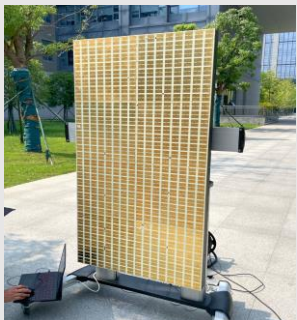


无去耦措施，单元间较大的耦合使得有源S参数恶化严重

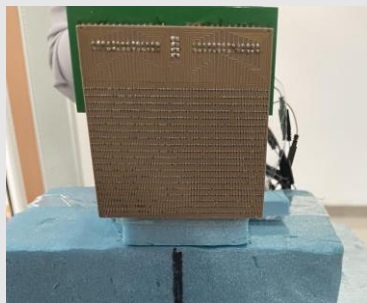


目前业界用于测试**多为单极化RIS**，测试时需保证入射极化方向与RIS单一极化方式对准

## 东南大学



单极化/1bit/2.6GHz/列控

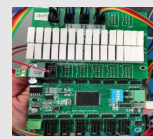
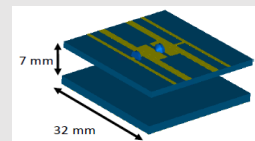


单极化/2bit /26GHz/列控

## 华为（购买南京大学）



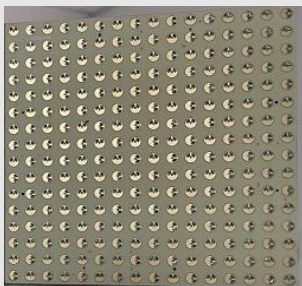
单极化/2bit /2.6GHz/点控/带宽200M



目前业界**双极化样机**：

- 双极化（棋盘拼凑）
- 双极化（双板拼接）
- 双极化（单元双极化，主要在静态RIS上实现）

## 行晟科技（清华）



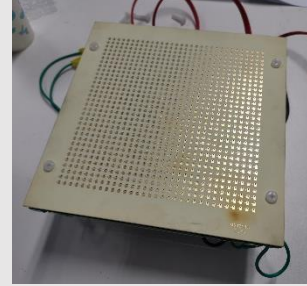
双极化（棋盘分布）/1bit /26GHz/点控

## 北邮（购买行晟）



单极化/1bit /26GHz/点控

## 大唐（购买北大）

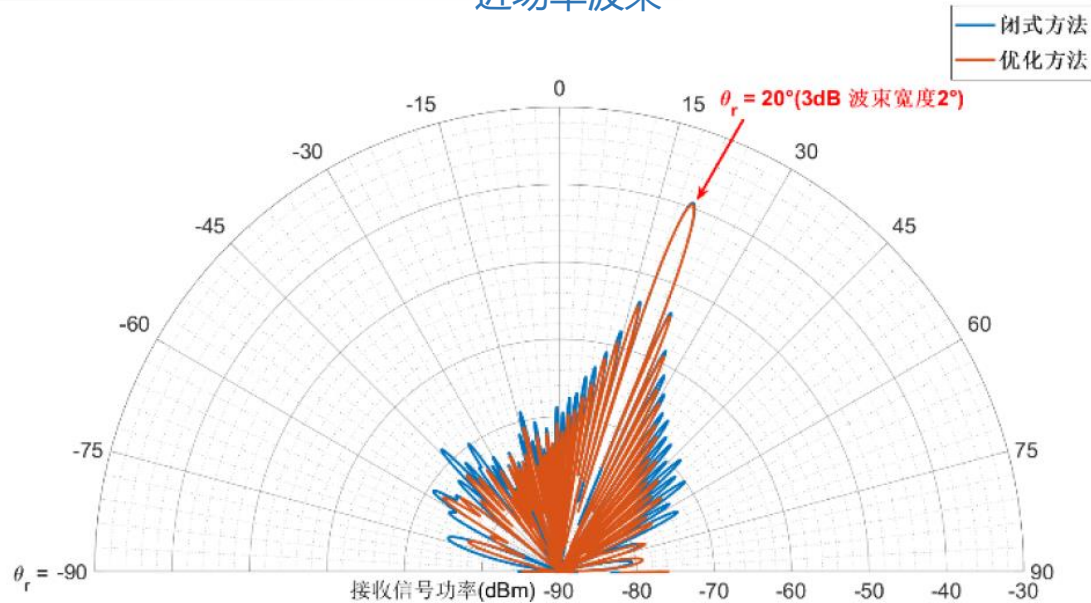


双极化（两块单极化板）  
/1bit /26GHz/点控

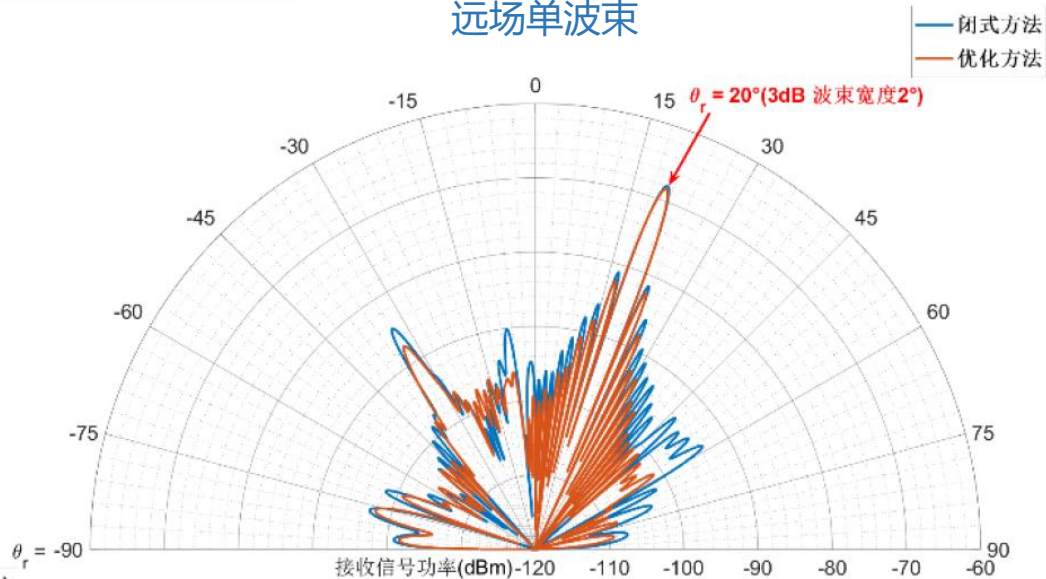
- **目前用于测试的双极化样机均为拼凑**（棋盘或者双板），较易实现，能够满足双流性，但是对于每种极化方式的面板利用率为1/2，依然**无法解决反射产生镜像极化分量干扰**的问题

- RIS受限于实际硬件的约束，多数为离散相位调控，基于连续相位假设优化得到的单元相位经过量化，会有一些性能损失，多波束时更为明显
- 码字设计通常遵循适用于远场范围的DFT码本，但RIS有可能在近场条件下工作
- 可以以闭式解为初始值，采用非线性启发性优化算法（如遗传算法，人工蜂群算法等）

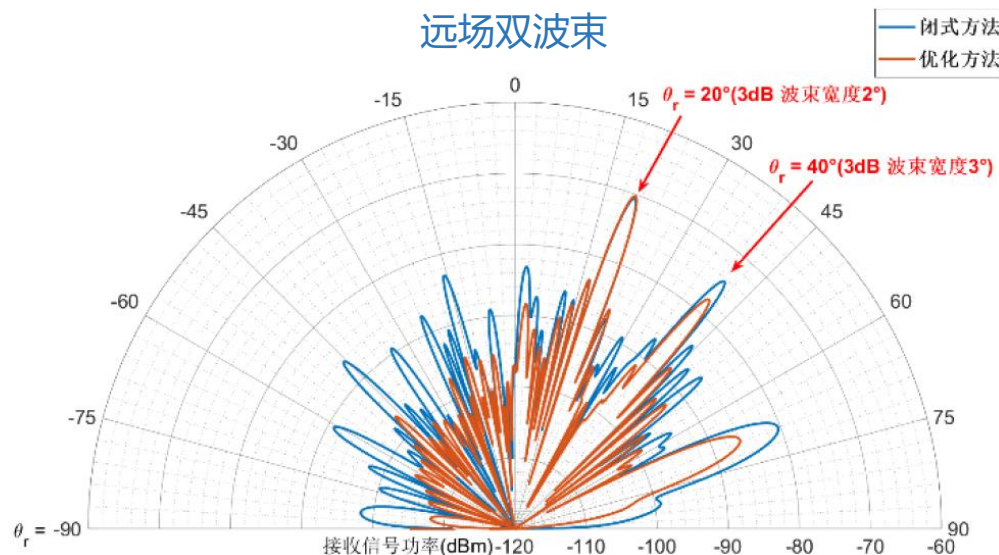
近场单波束



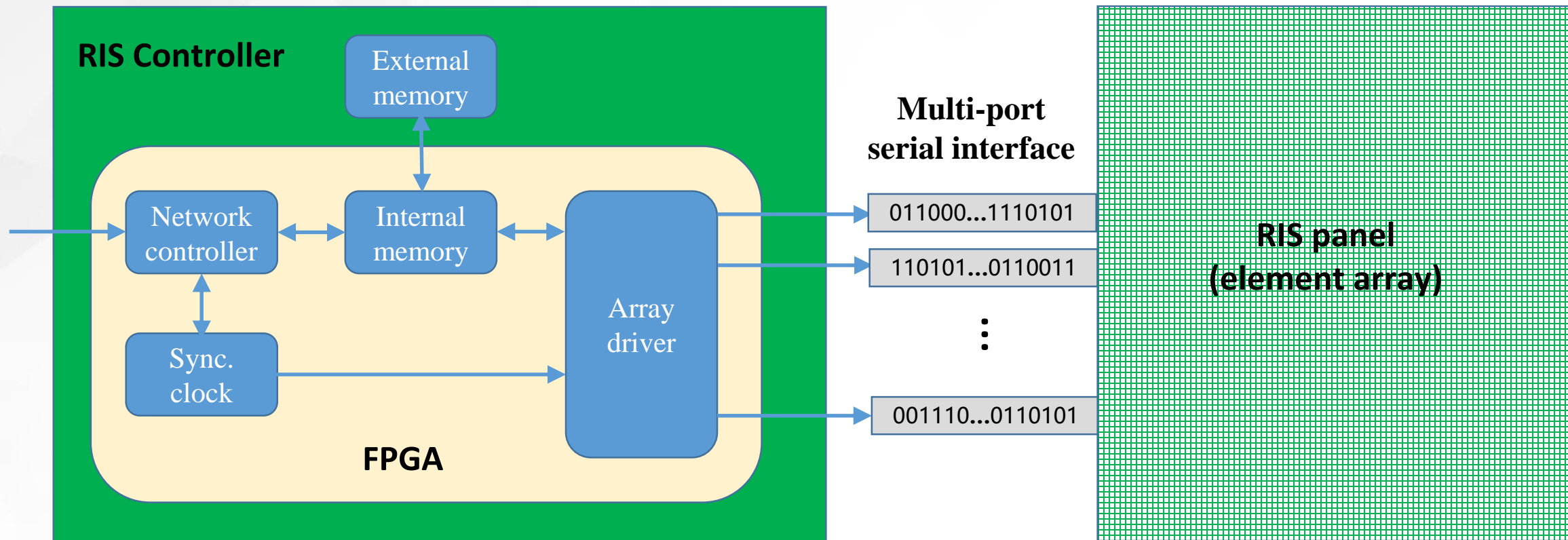
远场单波束



远场双波束

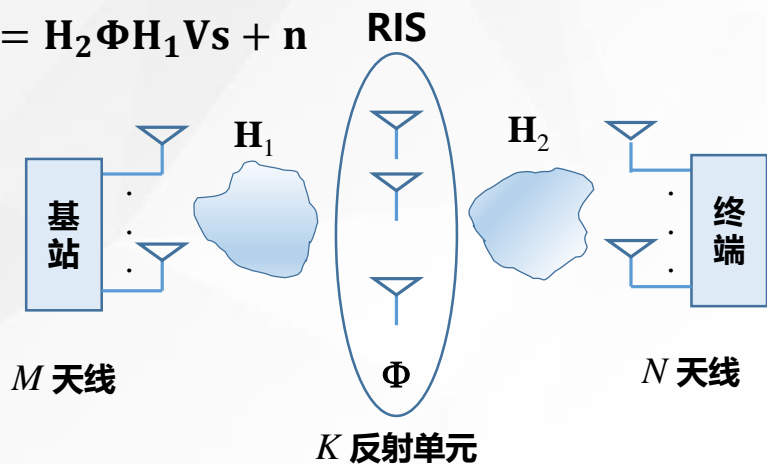


\* 与东南大学金石老师团队的联合研究



- RIS控制器中的网络控制单元具有一定的通信功能，最好通过无线方式，以提高部署灵活性 →与空口标准化的衔接？
- 码字刷新/调整/存储等可以在控制器内存和外存中完成，需充分考虑RIS单元的非理想特性
- RIS驱动器根据网络控制单元的指令，在内存/外存中得到相应的码字，然后结合同步时钟，转化成比特流，串行或者并行驱动均可

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_2 \Phi \mathbf{H}_1 \mathbf{V} \mathbf{s} + \mathbf{n}$$



$$\max_{\mathbf{F}, \Phi} \log_2 \det(\mathbf{I}_N + \mathbf{H} \mathbf{V} \mathbf{V}^H \mathbf{H}^H)$$

subject to  $\text{tr}(\mathbf{V} \mathbf{V}^H) \leq P_t$  and  $|\phi_k| = 1, \forall k \in \mathcal{K}$   
where  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_2 \Phi \mathbf{H}_1$

迭代加权MMSE 算法  
复杂理论\*

$$\max_{\mathbf{V}, \Phi} \log \det(\mathbf{I}_N + \mathbf{H} \mathbf{V} \mathbf{V}^H \mathbf{H}^H \mathbf{R}_n^{-1}) \rightarrow \min_{\mathbf{V}, \Phi, \mathbf{U}, \mathbf{W}} \text{tr}(\mathbf{W} \mathbf{E}) - \log \det(\mathbf{W})$$

s.t.  $\text{tr}(\mathbf{V} \mathbf{V}^H) \leq P_s, |\phi_k| \leq 1$       s.t.  $\text{tr}(\mathbf{V} \mathbf{V}^H) \leq P_s, |\phi_k| \leq 1$

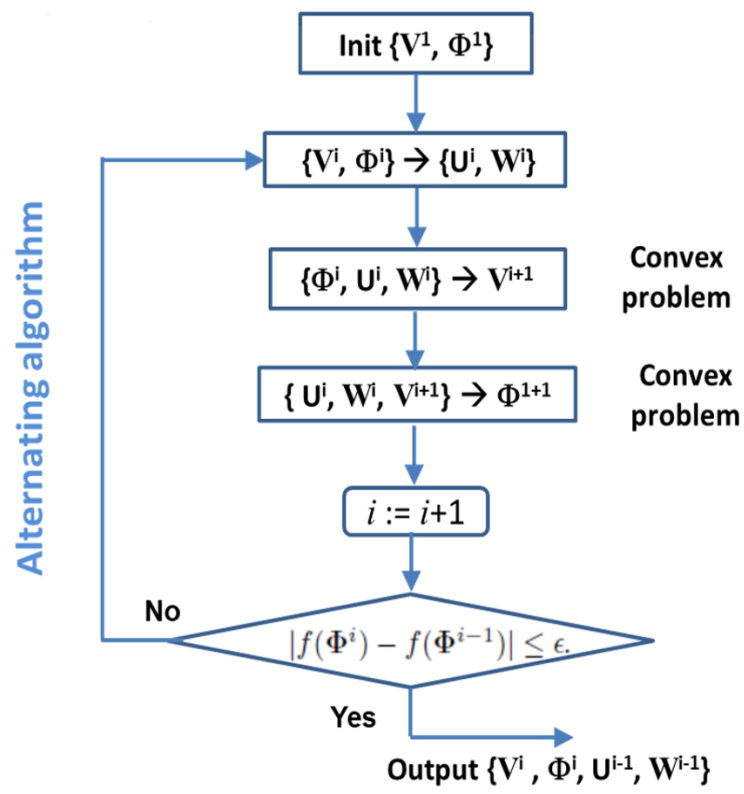
复杂RIS理论求解需要在实际系统中简化 → 工程可实现的方案

$$\mathbf{y}_{\text{eq}} = \mathbf{U}_2^H \mathbf{y} \propto \mathbf{V}_2^H \Phi \mathbf{U}_1 \mathbf{s} = \mathbf{V}_2^H \Phi_2 \Phi_1 \mathbf{U}_1 \mathbf{s}$$

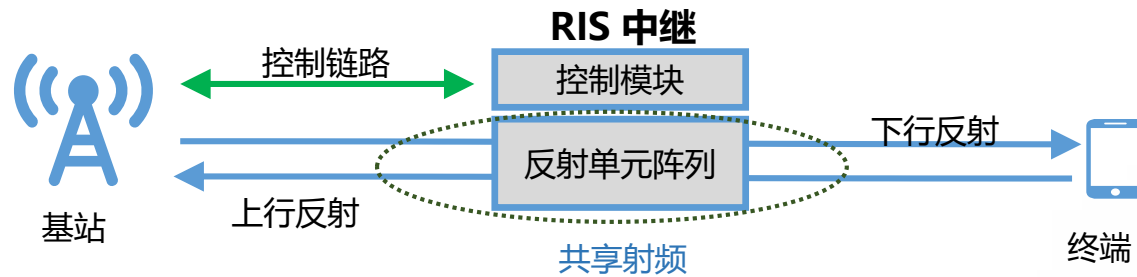
RIS输出相移匹配  
RIS-UE信道发端特性      RIS输入相移匹配BS-  
RIS信道收端特性

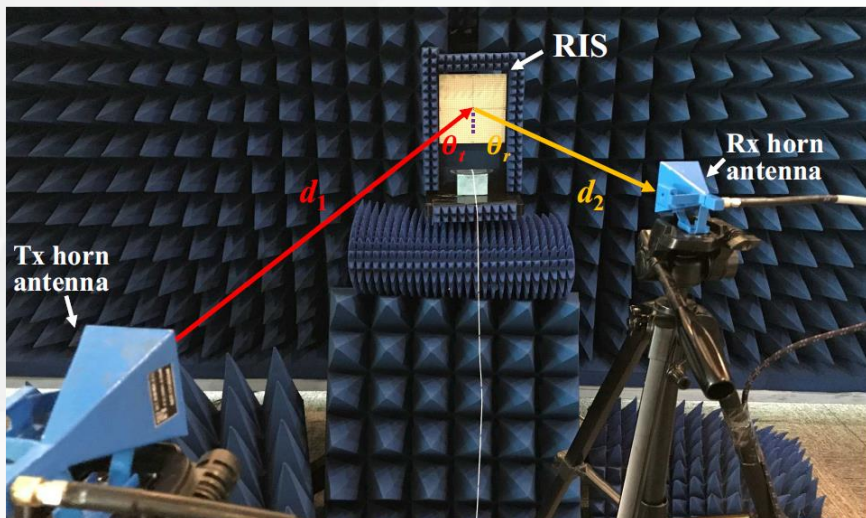
信道秩(Rank)=1, 退化成RIS波束对准问题

简化求解



网络控制的直放站与RIS中继的空口控制有一定的异同

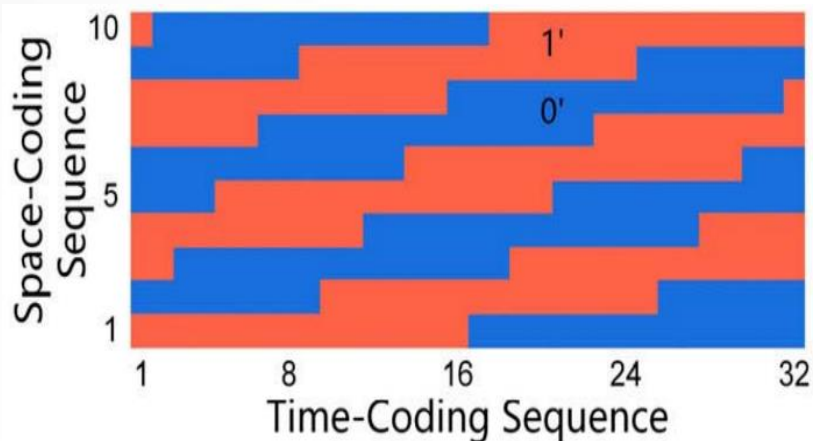




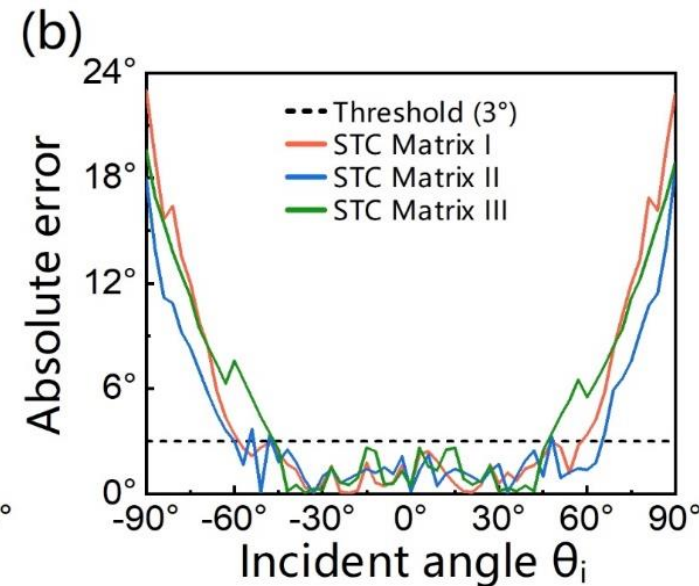
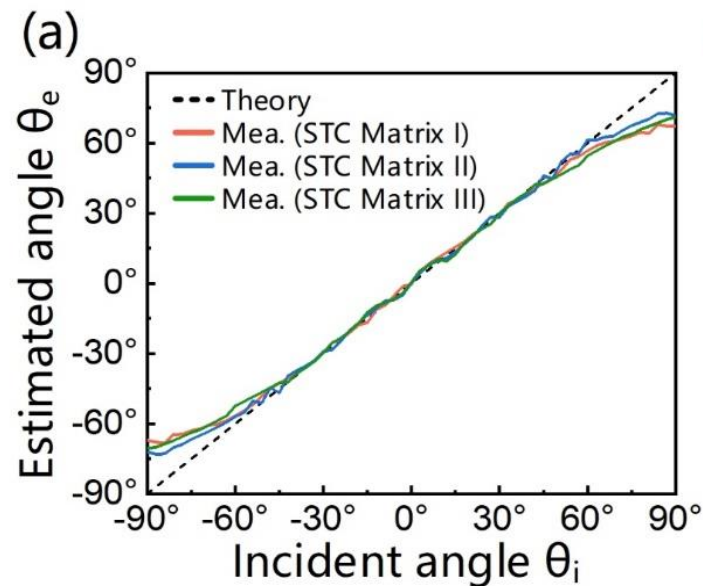
- RIS作为一种无源器件，其每个天线单元的孔径较小，增益十分有限
- 考虑BS-RIS路损与RIS-UE路损的乘性关系，每个天线单元的级联信道路损严重，信号过弱，难以保证准确的信道测量与估计
- 在通常测试中，RIS板是当作一个整体，从测得的总的天线方向图反推每个单元的天线方向图



初期RIS部署的**信道估计以波束赋形**为基本假设

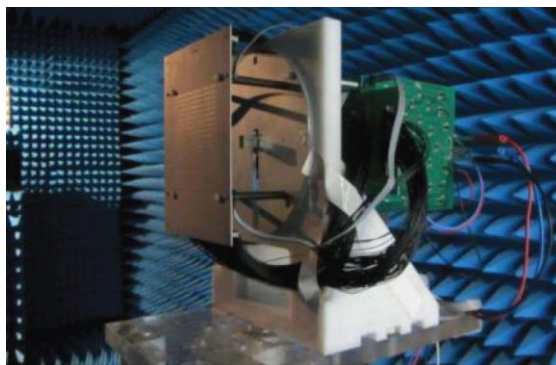
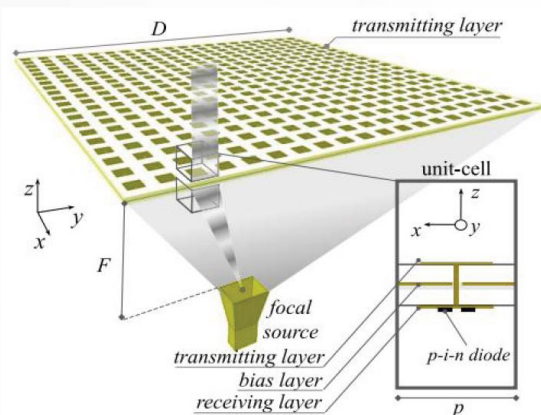


RIS单元相位的时空编码

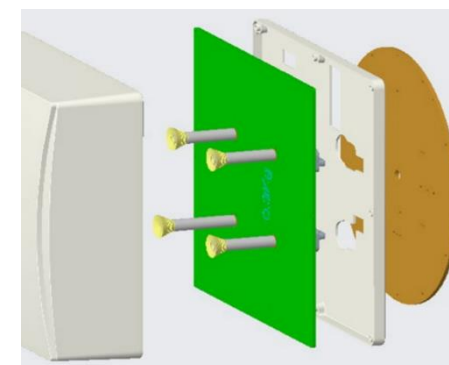
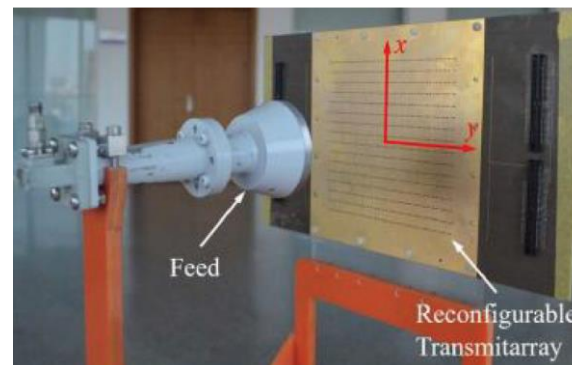
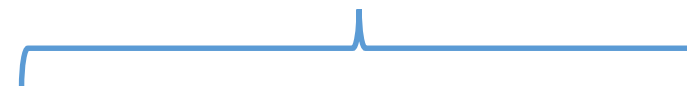


- 透射式的插损较高，多层结构复杂
- 反射式的波束扫描范围大，损耗相对较低，比较成熟，较易实现，馈源可以是喇叭天线或者波导天线

## 透射式

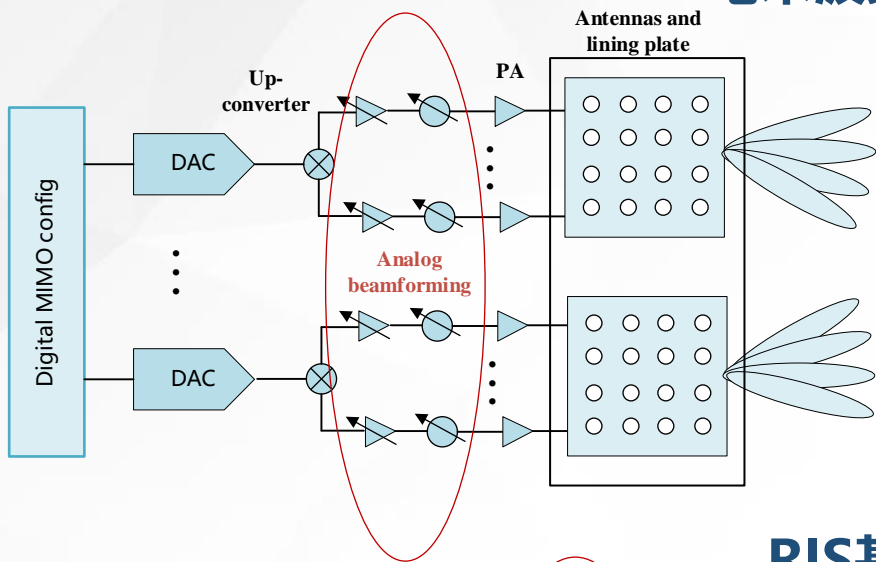


## 反射式



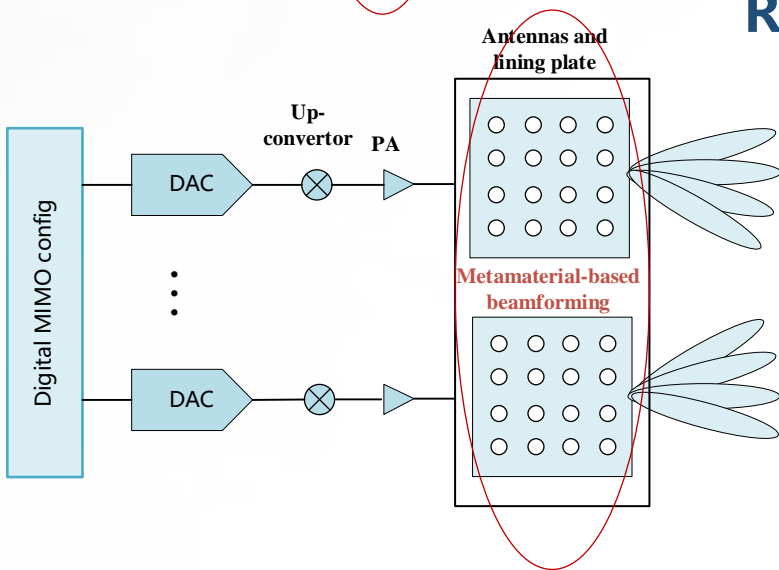


## 毫米波数模混合天线



- ✓ 采用专用移相器件进行调相
- ✓ 每个数字通道对应器件多
- ✓ 数模混合波束赋形，精度高
- ✓ 支持双极化

## RIS基站天线



- ✓ 主要控制超表面单元相位电磁特性
- ✓ 结构简单，每个数字通道对应器件少
- ✓ 量化比特导致波束赋形精度不很高
- ✓ 双极化和联合幅度/相位调控有待突破
- ✓ 无源增益较低，需功放补偿或增大口径

EIRP计算	传统基站	RIS基站
天线阵子数	256	625
数字通道数	4	4
PA出口功率 (dBm)	10	32
天线增益(dB)	30	26
MIMO增益 (dB)	24	6
Tx EIRP (dBm)	64	64

**256 PAs vs. 4 PAs**

- 宏站场景，RIS基站整体性能有差距，当前较难取代传统天线
- 小微站场景：RIS基站有望以低成本和低功耗实现波束赋形

Main feature	Sub-feature	Key areas	Characteristics	
LTE relay	Type relay 1	R-PDCCH design	Interleaved R-PDCCH Non-interleaved R-PDCCH	
		Relay timing and backhaul subframe structure	Cell size < 6 km	
			6 km < Cell size < 15 km	
			Cell size > 15 km	
	Backhaul subframe configuration and HARQ timing	FDD: 255 config., 6 HARQ processes TDD Config #1, #2, #3, #4, #6		
Type relay 2	Cooperative mode Resource reuse mode	-		
FD-MIMO	Channel model	Geometry based statistical model (GBSM) based	3D based coordinates	
			3D related parameters	
	Enhanced MIMO for vertical beams	Mapping for digital antenna ports to antenna elements	-	
			Codebook design	Kronecker product of PMI of horizontal antennas and PMI of vertical antennas
			Downlink control	DCI format enhancement
CSI feedback	PMI/RI/CQI enhancements			

- 部署场景需要具有普遍性，例如宏网的容量增强、覆盖延伸等
- 技术方案要能最有效的解决问题，不能堆砌必要性不强的专利技术
- 空口技术发展要紧密结合相关实现类技术的发展 and 突破



- 循序渐进，以Rel-18的网络控制直放站（NCR）作为序曲，研究相关的控制信令，RIS研究可以借鉴
- Rel-19的RIS信道测量与建模为RIS研究打下坚实基础
- 伴随着RIS器件设计与生产的不断进步，RIS面板的需求量不断提高，批量效应明显，硬件控制逐渐由昂贵高能耗的FPGA向低成本低功耗的ASIC迈进，促进6G RIS空口技术的研究和标准化

低成本、低功耗，智能反射面无需功放，**无自干扰的全双工**，**无噪声放大**

系统参数，RIS**振元数量**远大于NCR，因此RIS**波束更窄**

控制链路简化，NCR的控制链路和回传链路**共享**射频模块；RIS有被动特性，控制和信号反射**可以分开**，**有望简化控制设计**

硬件架构	RIS	NCR
控制链路	控制链路的射频与反射链路可以相互 <b>独立</b> ，也可共用	NCR-MT：控制链路和回程链路可 <b>共射频</b>
转发模块	回程链路和接入链路 <b>共用射频</b> ，全双工	NCR-Fwd：回程链路和接入链路 <b>射频分开</b> ，全双工
工作模式	控制链路可独立工作，上下行均与回程同时工作，也可与NCR类似配置	下行：控制和回程同时工作或TDM 上行：控制和回程TDM，同时工作取决于NCR能力
信道模型	基于电磁波的反射原理，阵子多，面积大，间距小，阵子间耦合效应和近场效应更明显： <b>不同的信道估计和反馈算法设计</b>	基于电磁波的辐射原理，沿用现有的信道模型
控制需求	仅需对控制模块供电，有望节能： <b>不同的控制方案设计</b>	功率放大，供电需求大
转发特性	即使无相位加载也可进行 <b>镜面反射</b>	关断NCR-Fwd的射频单元即停止转发

更简化的波束管理流程设计

名目		技术参数/工艺	单价	数量	
控制单元	FPGA	Virtex-5 FX100T	1000	1	
	DAC	双输入/输出 FlexRIO适配器 (100 MS/s采样速率)	60	1	
	时间模块	10 MHz	50	1	
	电源模块	DC ( $\pm 20V$ )	150	1	
超表面面板	贴片元器件物料及工艺成本	变容二极管	SMV-2019 (Skyworks, Inc)	3	512
		电容	1 pF	0.1	512
		SMT	浸焊	0.02	1024
	PCB板材	物料	F4BK265 (介电2.56, 损耗正切0.001)	300	1
		加工	沉金 (线宽0.4 mm)	80	1
合计			<b>3497.68</b>		

- FPGA成本占比较大 → 逐渐由ASIC代替
- 二极管的总成本较大 → 为超表面器件定制, 放松对RIS不重要的一些指标参数, 降低单价

FPGA模块 + 数字信号输出模块 + 面板 =



总能耗: 15 W

- 定制化芯片: ASIC芯片替代FPGA
- 特定结构设计



能耗降至5W

## 蓄电池方案:

(蓄电池成本200-300)



电池容量: 24V22AH, 528WH  
现有设备: 1.5天  
优化设备: 4.5天



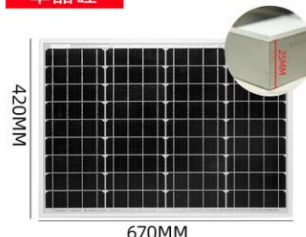
电池容量: 24V36AH, 864WH  
现有设备: 2.4天  
优化设备: 7.2天

## 太阳能方案:

(太阳能板成本100-150)

40W  
太阳能电板  
单晶硅

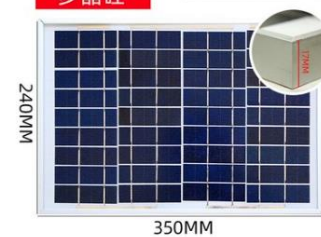
产品功率: 40W  
峰值电压: 19.8V  
峰值电流: 2.02A



现有设备功耗适合选用40W太阳能板

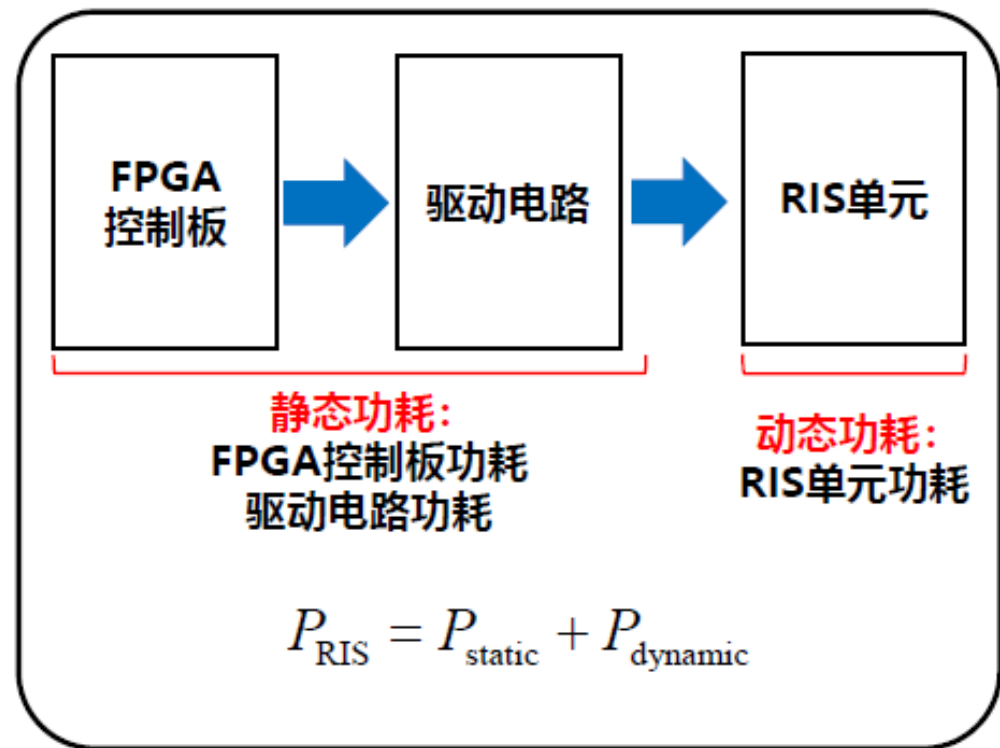
10W  
太阳能电板  
多晶硅

产品功率: 10W  
峰值电压: 17.5V  
峰值电流: 0.58A

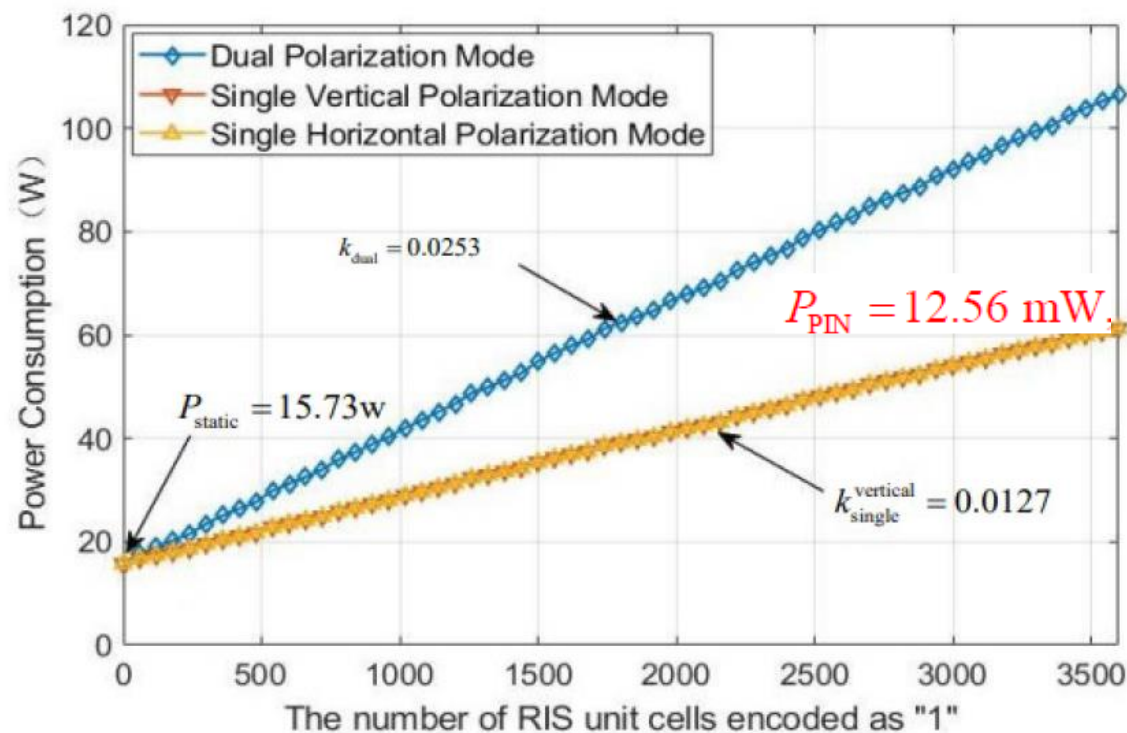


优化后, 可选用10W太阳能板

可考虑采用太阳能+蓄电池结合的方案, 可延长蓄电池更换时间



- PIN管RIS动态功耗: 与PIN管是否导通有关, 导通时会产生一定功耗
- 变容管RIS动态功耗: 动态功耗几乎为零, 因为当其工作时, 单元的变容管中的电流可以忽略不计



## □ 部署场景和信道模型

## □ 技术分析

- 超材料器件的调控
- 空口控制信令
- 基于RIS的基站
- 标准化策略

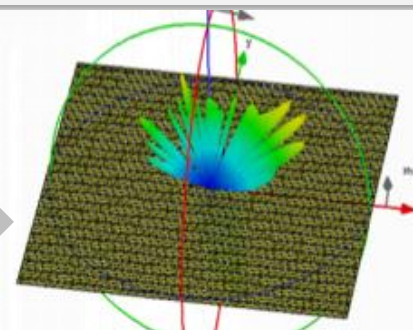
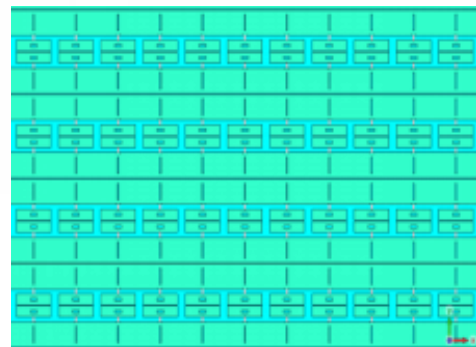
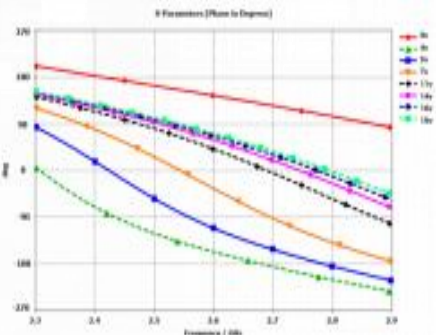
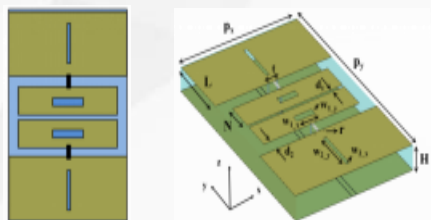
## □ 部分进展

- 超材料器件
- 系统仿真
- 现网测试

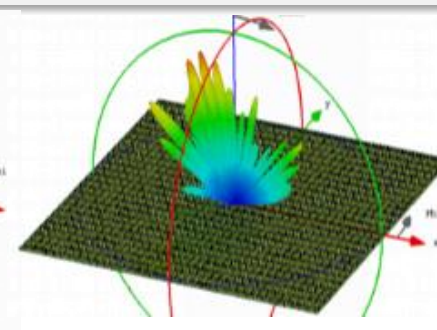


搭建电磁仿真平台，提出利用简易结构的、单元面积等效RIS单元相位的等效建模仿真方法，显著降低建模和仿真的复杂度，两种仿真结果体现了高度一致性

RIS智能反



$\theta_i = -15.4^\circ, \theta_t = 50^\circ$



$\theta_i = 50^\circ, \theta_t = -15.4^\circ$

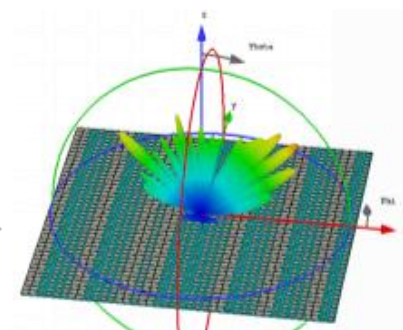
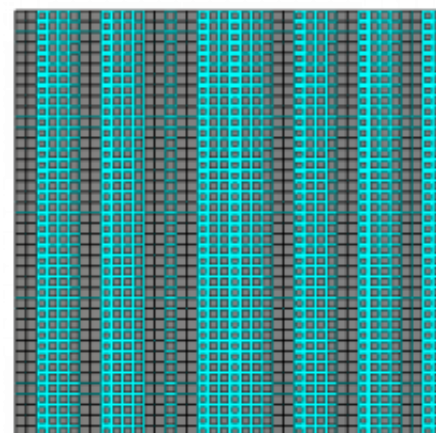
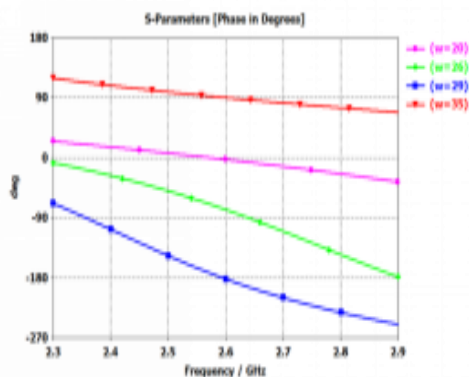
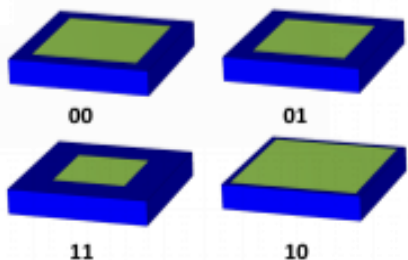
传统建模方法

RIS 单元及相位曲线

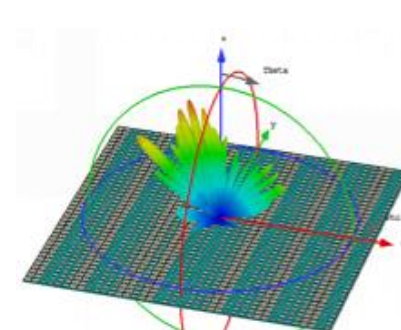
RIS阵列

结构复杂，需在电磁仿真软件CST中对所有元件的RLC参数逐一设置，复杂度高，建模仿真时间长

单元面积等效法



$\theta_i = -15.4^\circ, \theta_t = 50^\circ$



$\theta_i = 50^\circ, \theta_t = -15.4^\circ$

等效单元及相位曲线

等效阵列  
(MATLAB-CST联合建模)

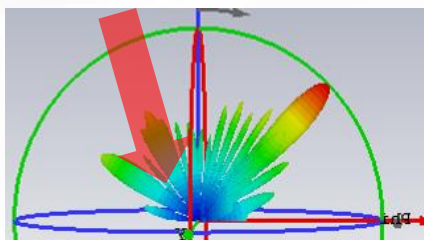
结构简单，MATLAB联合CST可以自动快速建模，无需逐一设置可调元件RLC参数，复杂度低，建模仿真时间短

对于列控RIS，当水平角 $\pm 60^\circ$ 范围内斜入射时，上下行波束的最大增益方向及功率满足互易性；当水平入射角过大，实际波束方向与目标波束方向发生偏差，此时互易性变差，误差范围尚可接受

对于点控RIS，互易性还需进一步验证，相位码字误差可能导致X、Y方向波束方向均有偏差，同时互易性变差

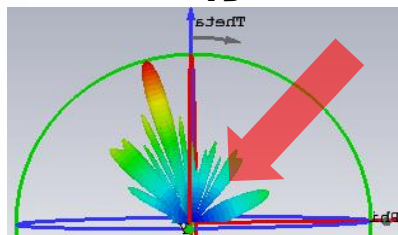
20x20

下行

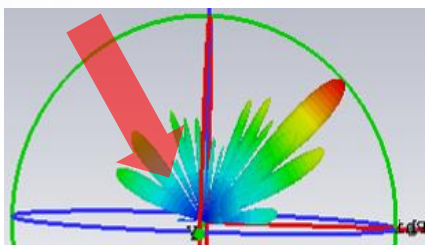


$(-15^\circ, 45^\circ)$

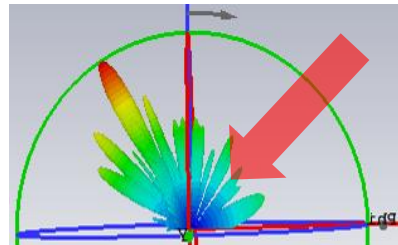
上行



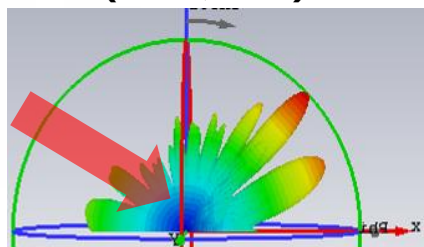
$(45^\circ, -15^\circ)$



$(-30^\circ, 45^\circ)$

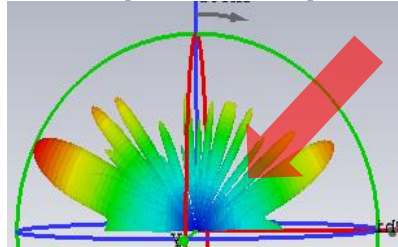


$(45^\circ, -30^\circ)$



$(-60^\circ, 45^\circ)$

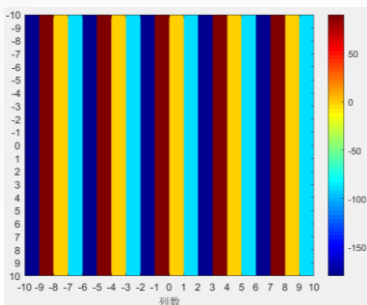
实际  $(-60^\circ, 44^\circ)$



$(45^\circ, -60^\circ)$

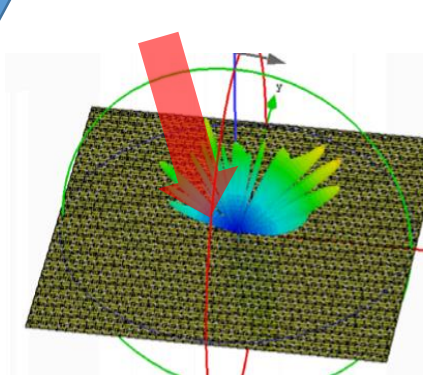
实际  $(44^\circ, -62^\circ)$

列控相位



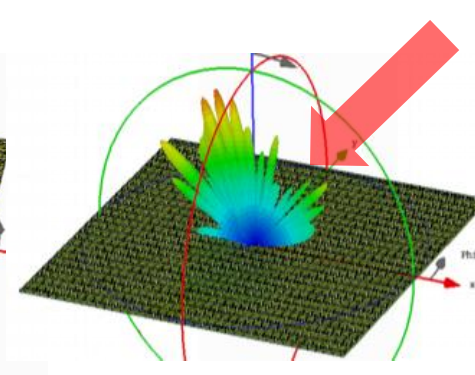
40x40

下行

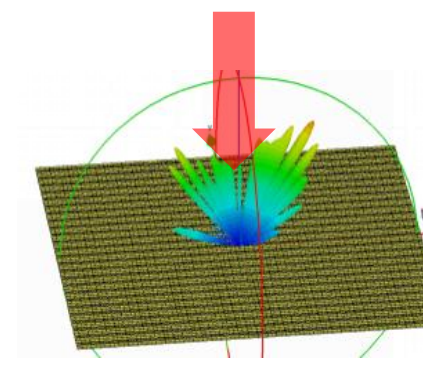


$(-15^\circ, 50^\circ)$  28.6dB

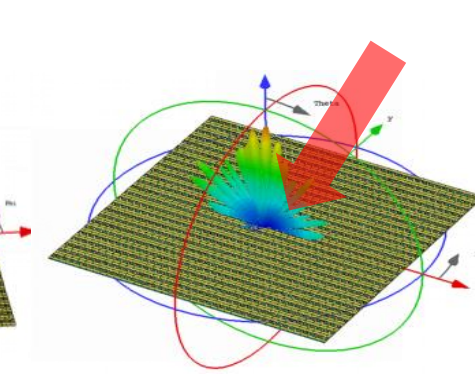
上行



$(50^\circ, -15^\circ)$  28.6dB



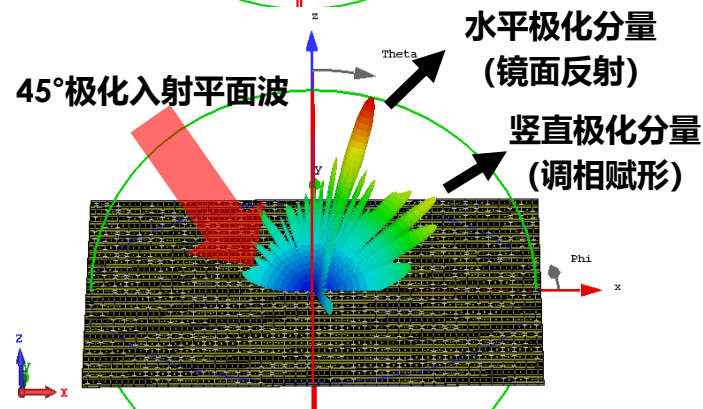
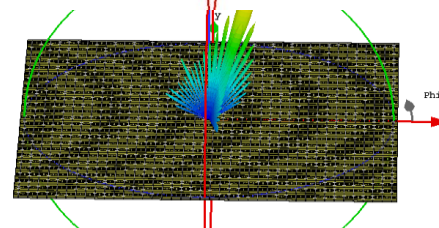
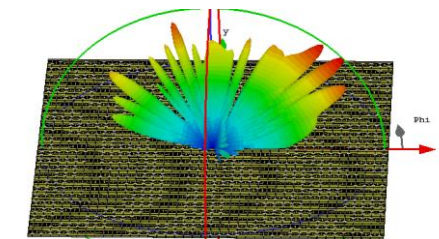
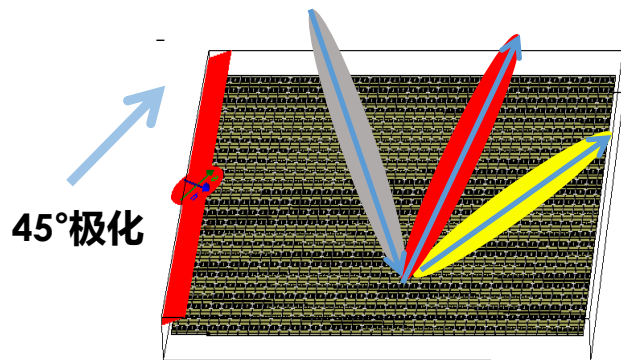
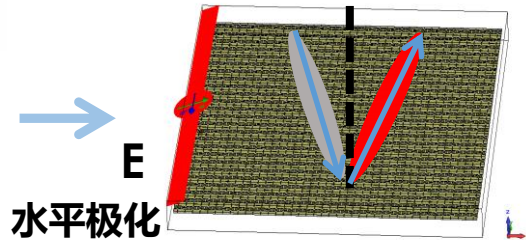
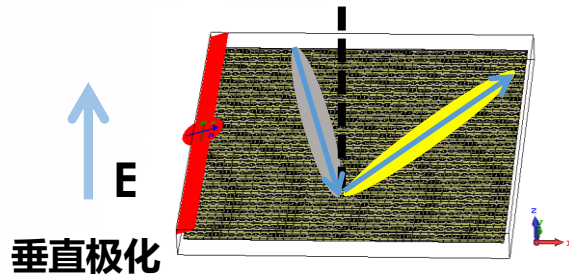
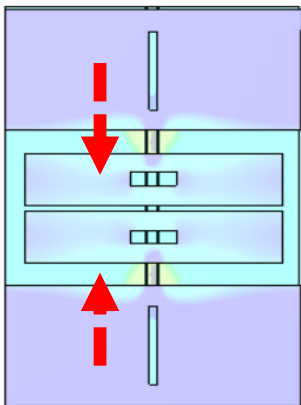
$(0^\circ, 30^\circ)$  30.7dB



$(30^\circ, 0^\circ)$  30.7dB

单极化RIS仅能对一种极化波（其电场平行于表面电流）调相及波束赋形，45°极化波经单极化RIS反射会出现两个主瓣方向不同的极化波束 → 双极化RIS的研究十分必要

单极化RIS表面电流沿竖直方向



提出一种利用忆阻材料实现RIS相位调节的RIS硬件结构，实现断电状态下的RIS相位保持功能，从而降低RIS能耗，实现节能和无源部署

## 方案一：双稳态 MEMS致动器 (中兴、行晟科技)

利用MEMS（微机电系统）开关替代PIN管或变容二极管

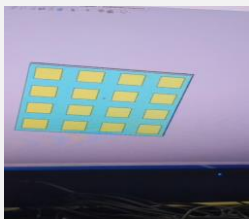


**优点：**可靠性高、尺寸小、功耗小  
**缺点：**需根据RIS需求进行定制化设计，研发成本高

RIS调相需要FPGA/单片机结合可调器件共同实现，其中FPGA能耗占比高，而PIN管、变容管等现有器件无法脱离FPGA保持状态

## 方案二：机械装置 (华为)

通过马达、齿轮传动等机械方式调整超表面顶层与底层间隙、改变图案形状等方式实现反射相位的调控

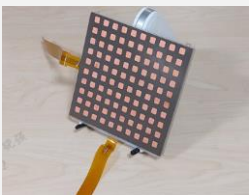


**优点：**实现简单、设计难度低  
**缺点：**响应速率慢、能量利用率低

对于半静态RIS，用新型器件/材料替代现有PIN管/变容二极管控制方案，有望以零/低功耗保持RIS相位状态

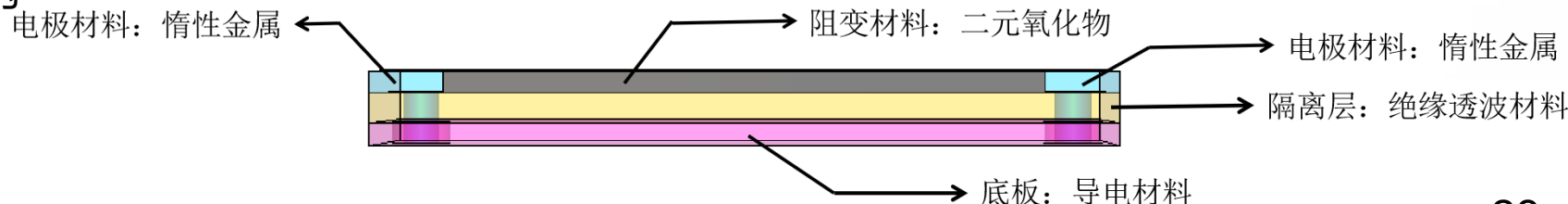
## 方案三：其他可调 材料 (京东方：液晶) 忆阻材料、电致形状记忆材料等

引入新型材料，根据材料特性采取电调、热调等方式改变材料等效电磁参数

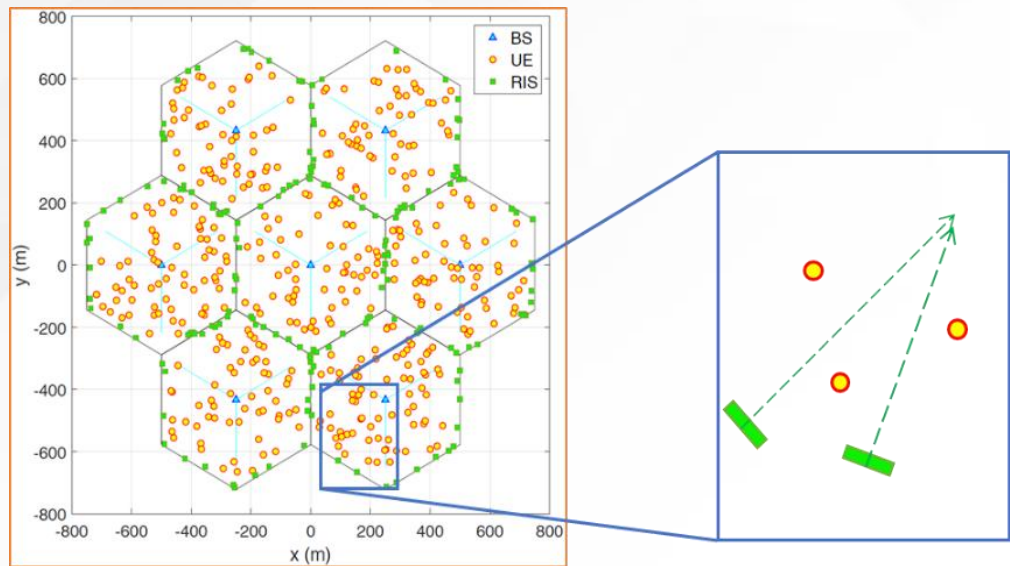


**优点：**实现方式多种，具有不影响调节速率、不改变RIS现有系统架构等特点  
**缺点：**设计难度高

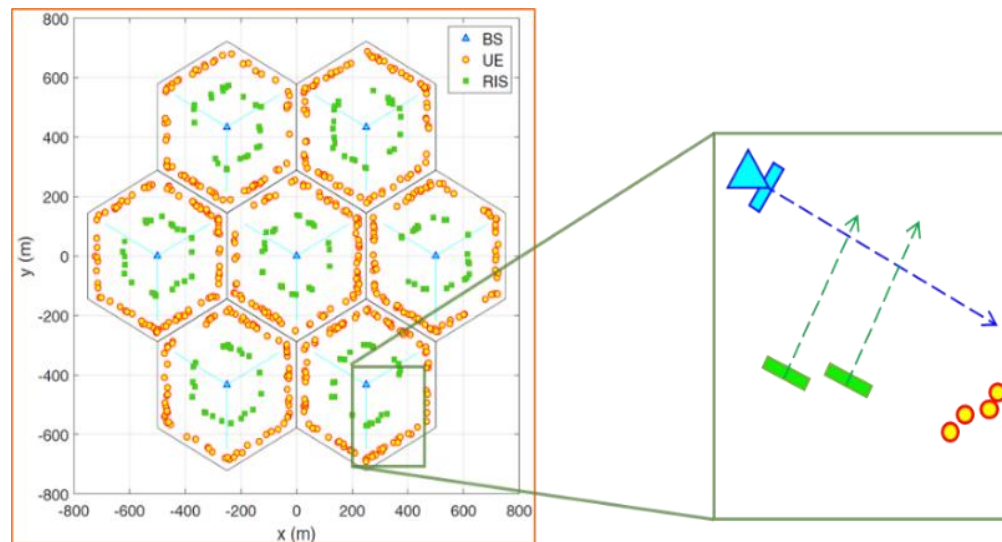
**设计方案：**结合忆阻器原理，利用二元或多元氧化物材料的忆阻效应，结合绝缘透波材料及高电导材料，设计可替代PIN管或变容二极管实现RIS相位调节多层RIS结构



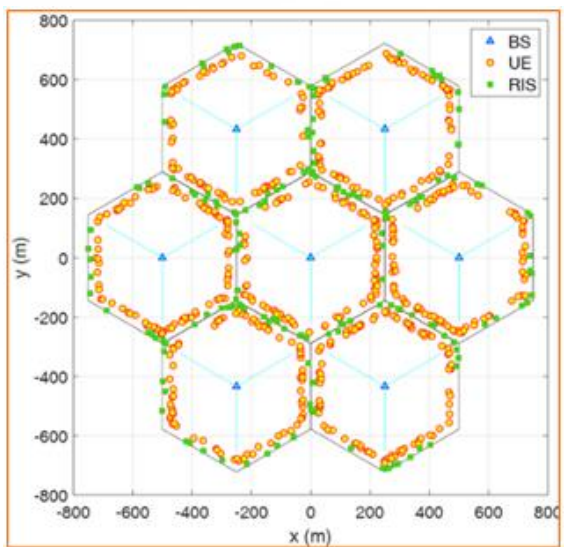
终端在小区均布， RIS部署在小区边缘



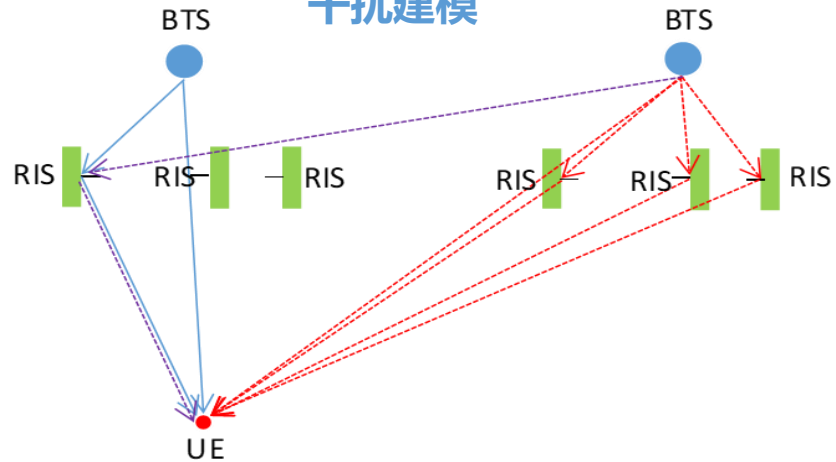
终端在小区边缘， RIS部署在小区的中环

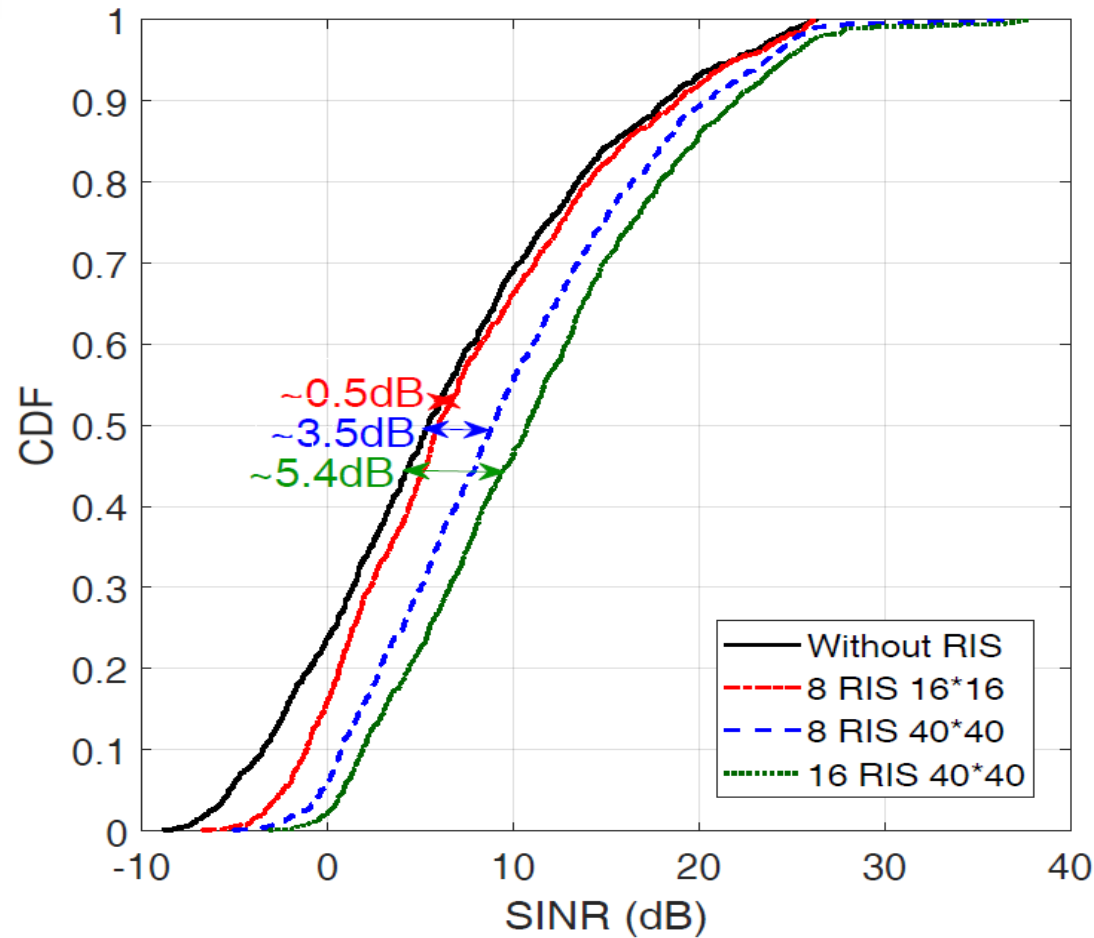
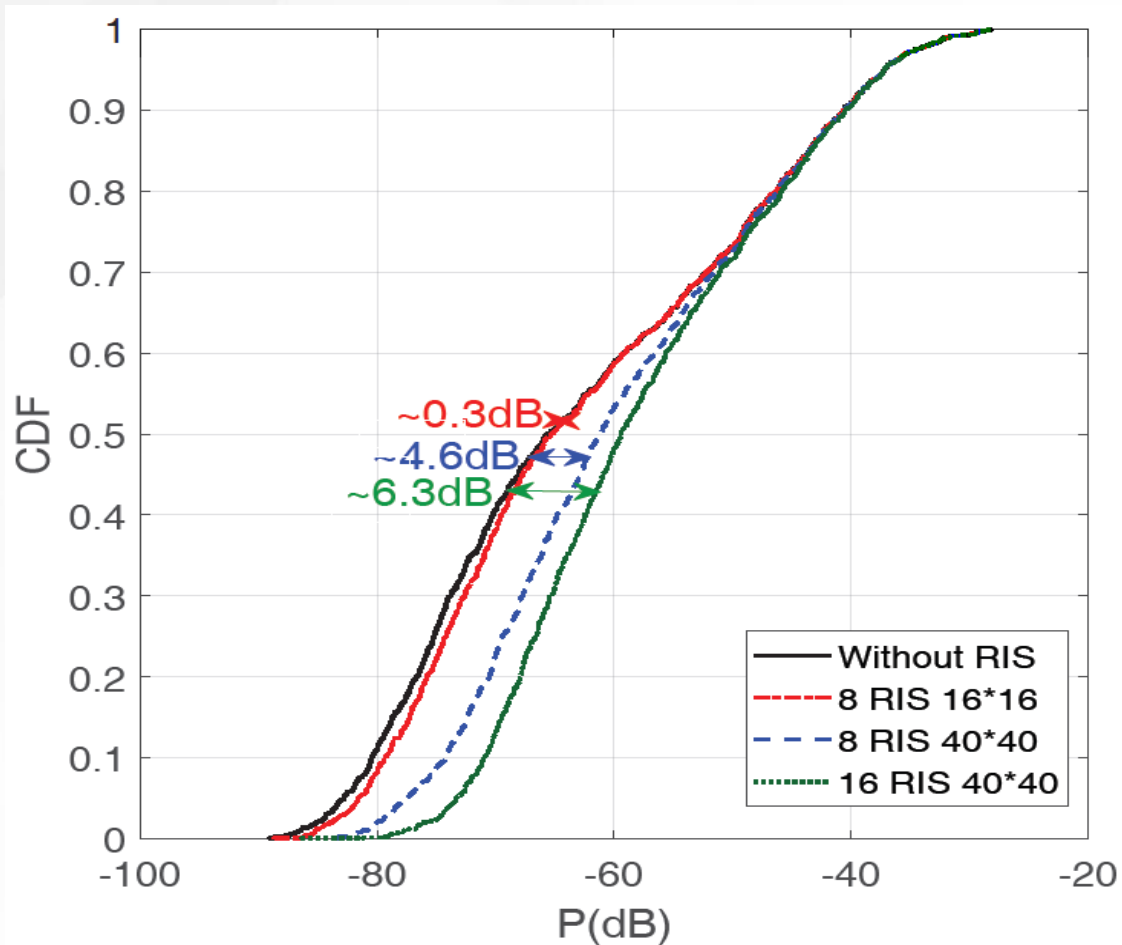


终端和RIS都在小区边缘

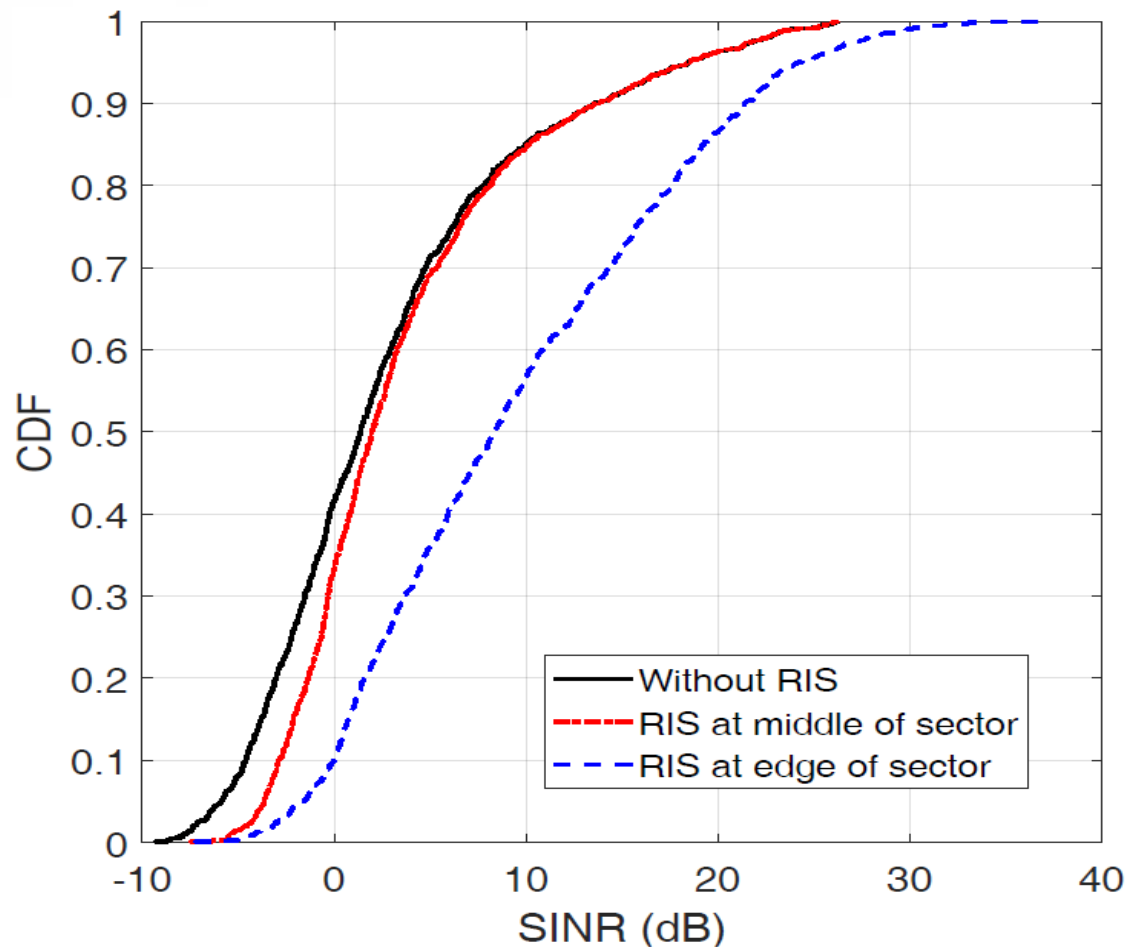
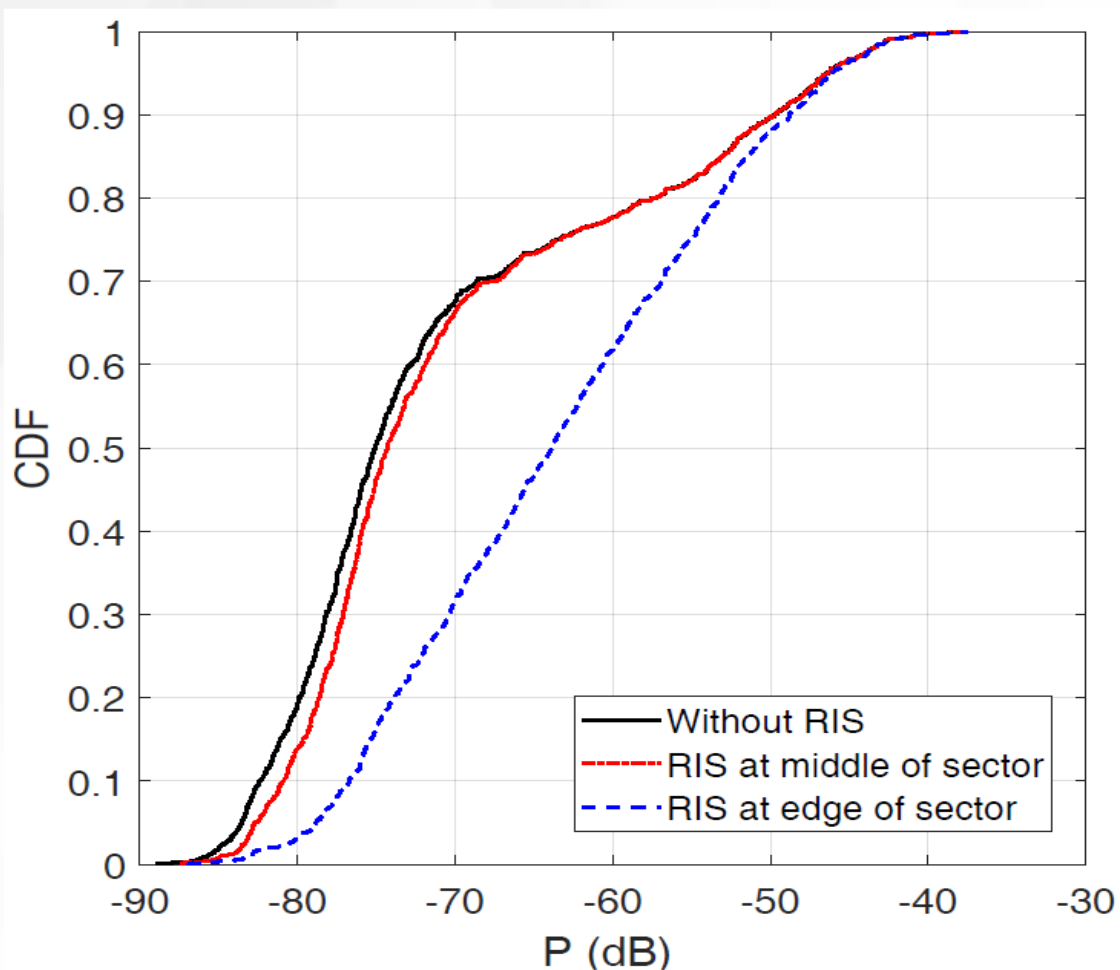


干扰建模

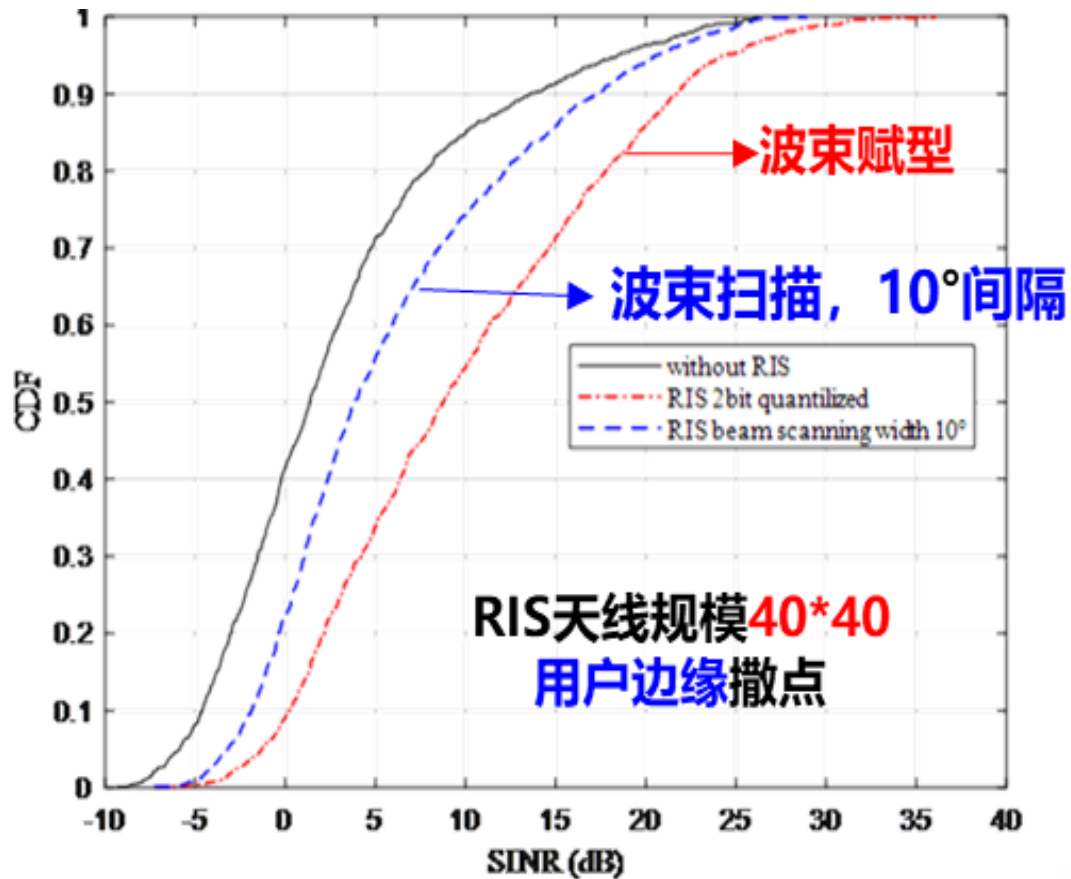
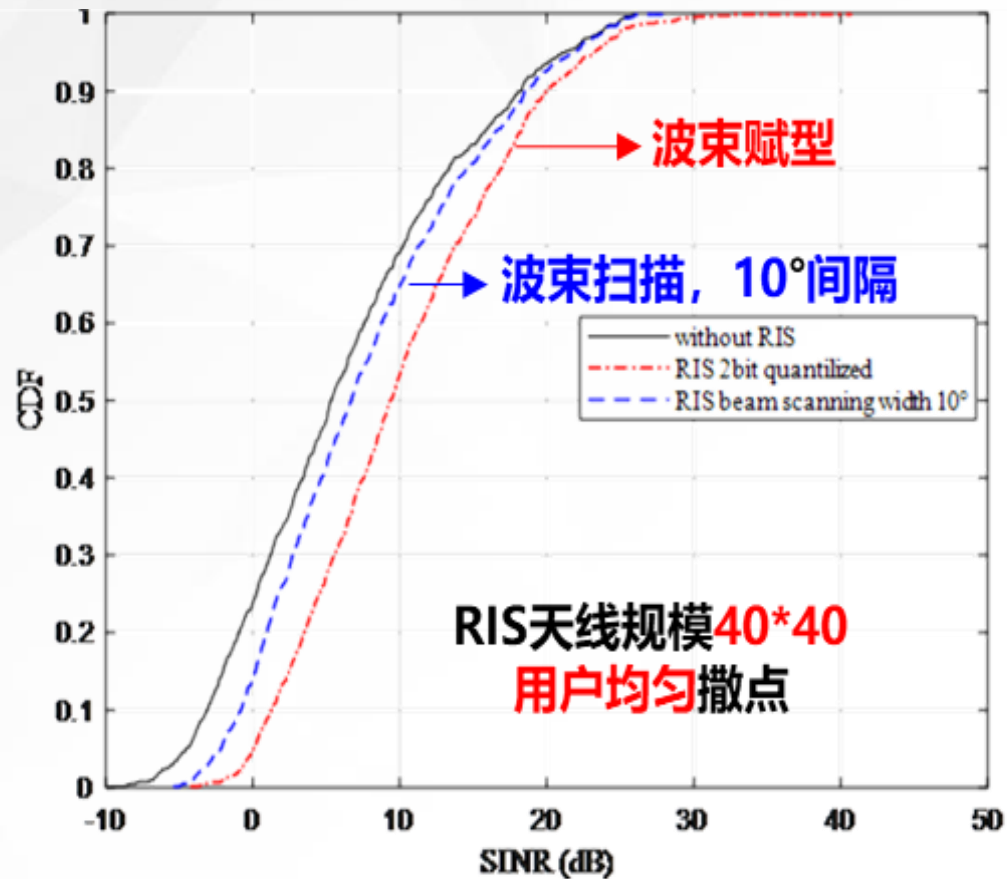




RIS布置在小区边缘, 用户在小区均匀分布情形



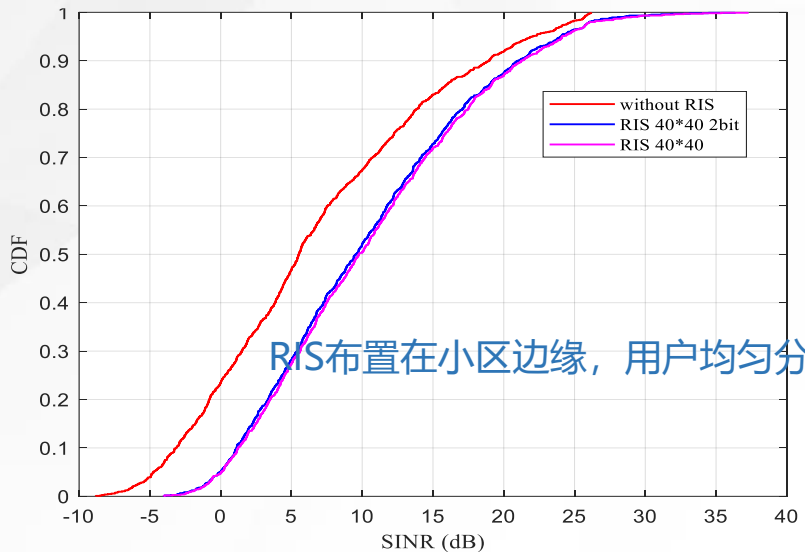
RIS布置在小区中间或者小区边缘，而用户在小区边缘情形



RIS布置在小区边缘, 用户均匀撒点或边缘撒点

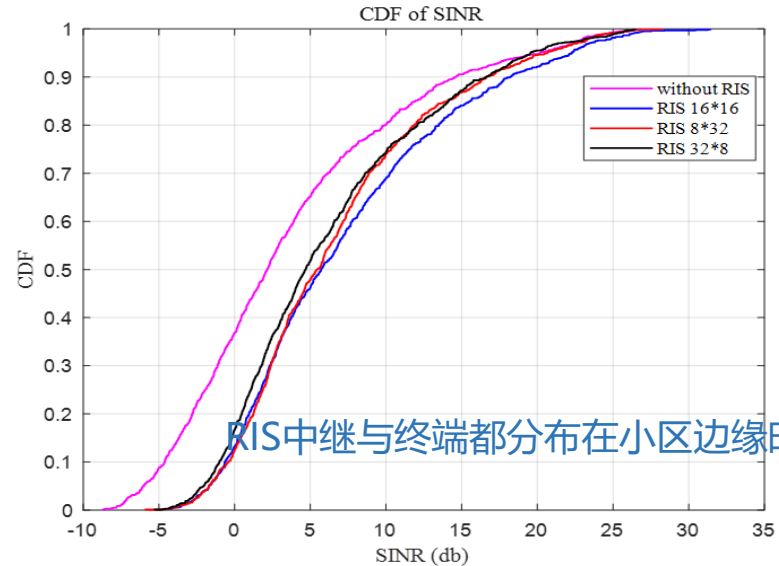


## 最优相位与2-bit量化



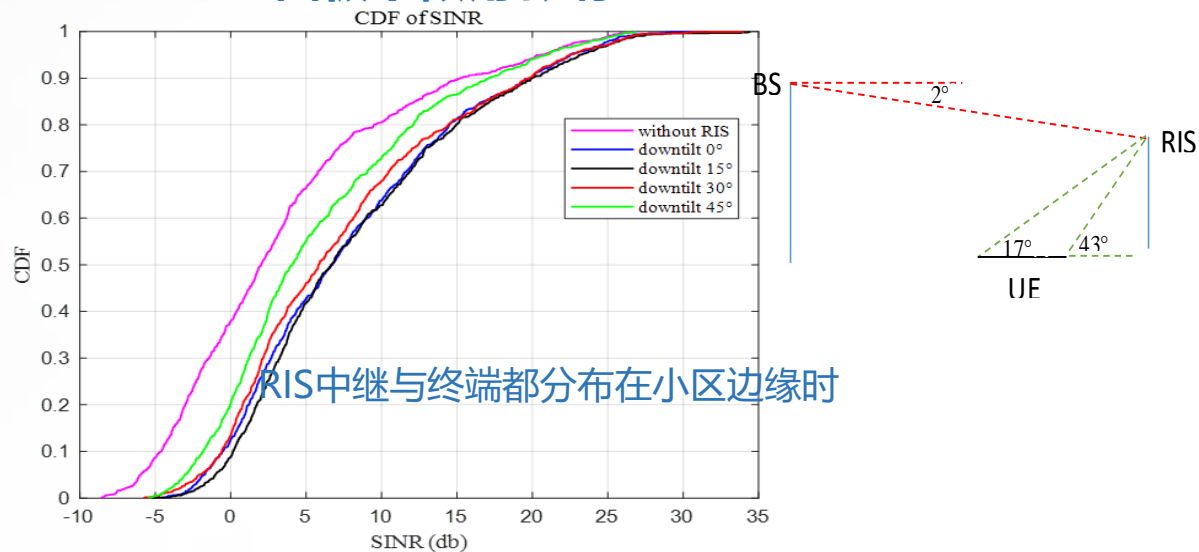
RIS布置在小区边缘，用户均匀分布

## RIS不同长宽比



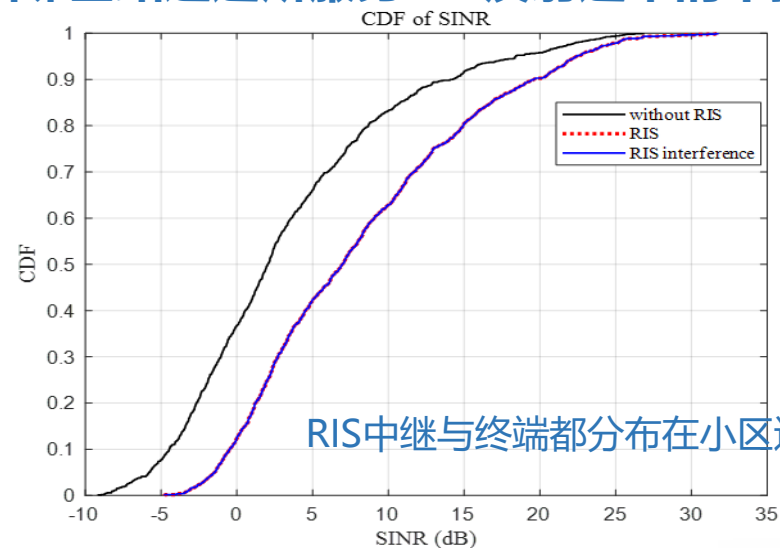
RIS中继与终端都分布在小区边缘时

## RIS面板下倾角影响



RIS中继与终端都分布在小区边缘时

## 相邻基站通过所服务RIS反射过来的干扰非常小



RIS中继与终端都分布在小区边缘时

- 协议中TB size的确定是基于以下公式，表征了如果RIS可以带来的容量提升效果，需从两方面的着手：**SINR和层数**

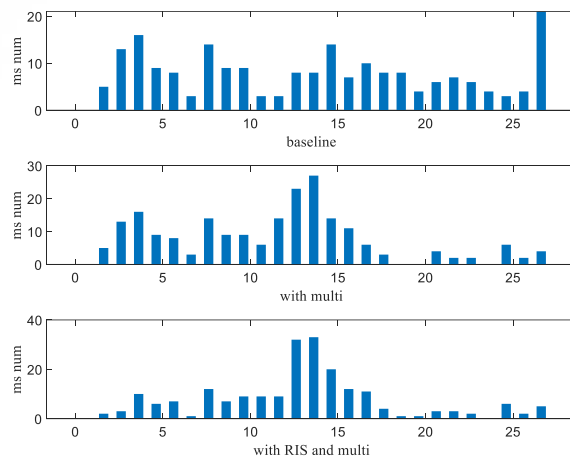
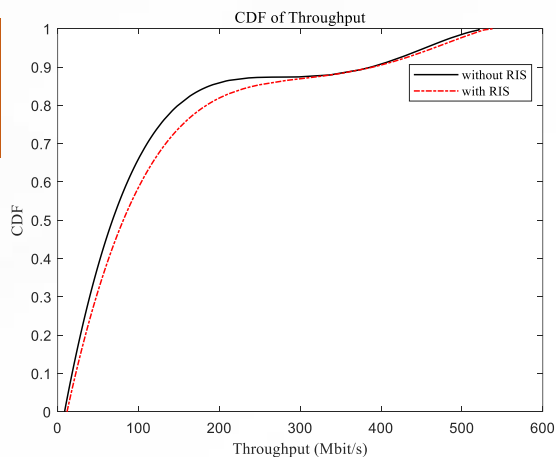
$$N_{info} = N_{RE} \times R \times Q_m \times v$$

$N_{info}$  (bits) =  $N_{RE}$  (REs) ×  $R$  (code rate) ×  $Q_m$  (modulation order) ×  $v$  (layers)

**SINR** → **CQI** → **MCS index**

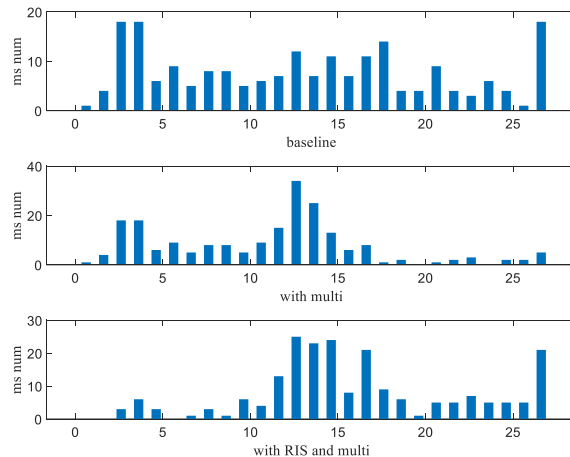
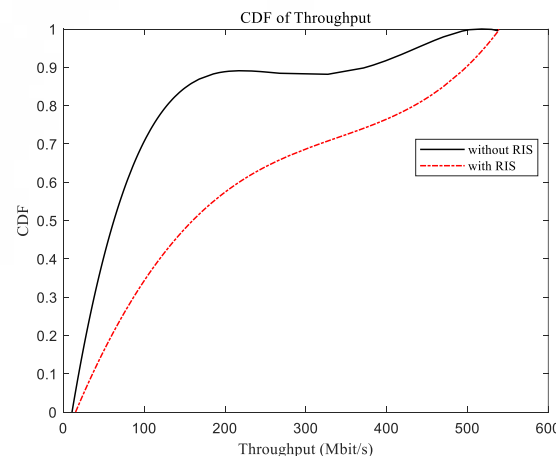
code rate ←  $R$   
 modulation order ←  $Q_m$   
 layers ←  $v$

基于SINR的系统级  
容量折算



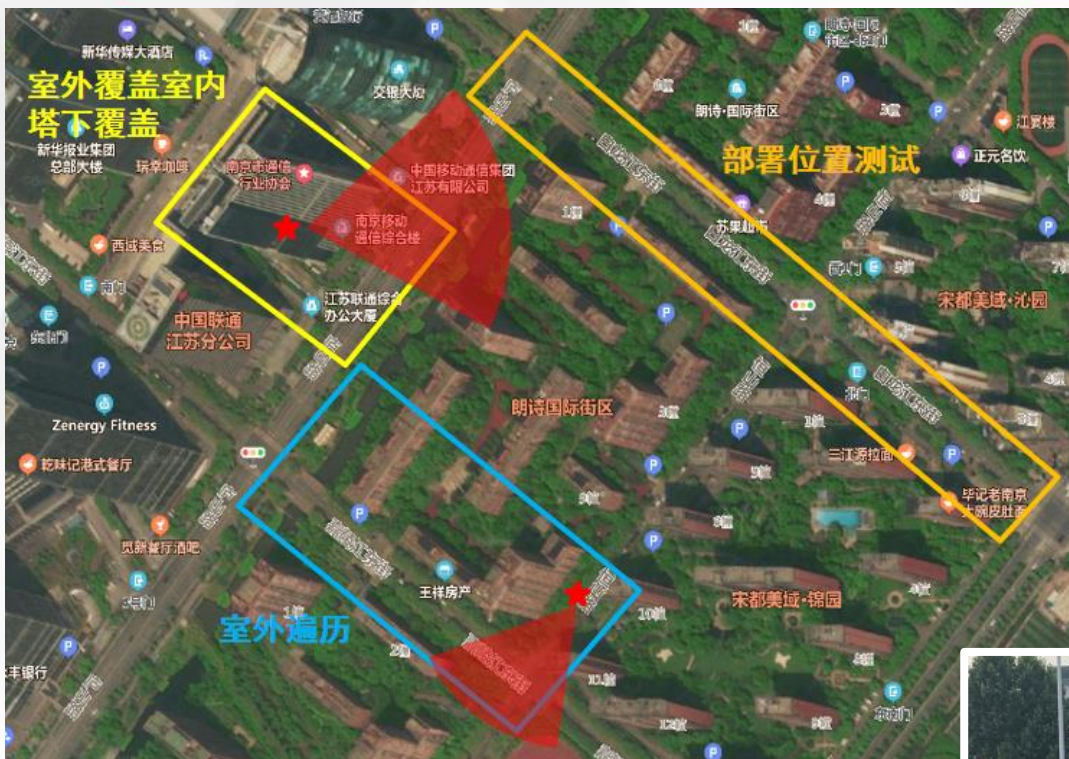
16×16

Unit: Mbps	Without RIS	With RIS	Gain
Average throughput	887.28	974.85	<b>9.87%</b>
Cell edge throughput	7.42	9.99	<b>34.63%</b>



40×40

Unit: Mbps	Without RIS	With RIS	Gain
Average throughput	887.28	1677.79	<b>89.10%</b>
Cell edge throughput	7.42	11.14	<b>50.13%</b>



## 基站配置

测试项目	发射功率	RRU类型	天线型号	安装下倾角	安装方向角	高度
塔下覆盖 部署位置 室外覆盖室内	327W	64通道	华为	9°/10°	60°	46
室外遍历	327W	64通道	华为	6°/3°	200°	10

## 小区配置

测试项目	扇区号	下行频点	下行带宽	物理小区标识	小区双工模式	时隙配比
塔下覆盖 部署位置 室外覆盖室内	1	504990	100	301	TDD	8:2
室外遍历	2	504990	100	13	TDD	8:2

## 智能反射面最大扫描角配置

水平/垂直入射角	水平/垂直出射角	水平波瓣宽度	垂直波瓣宽度
0°	±45°	7°	3.5°
15°	30° ~ -60°	/	/
30°	15° ~ -75°	/	/
45°	0° ~ -75°	7°	5.3°
60°	0° ~ -60°	/	/



## 智能反射面基本配置

尺寸	质量	单元数	输入电压	额定功率
160cm*80cm	/	16*32	24V	3-4W

\* 与东南大学崔铁军院士团队的联合研究

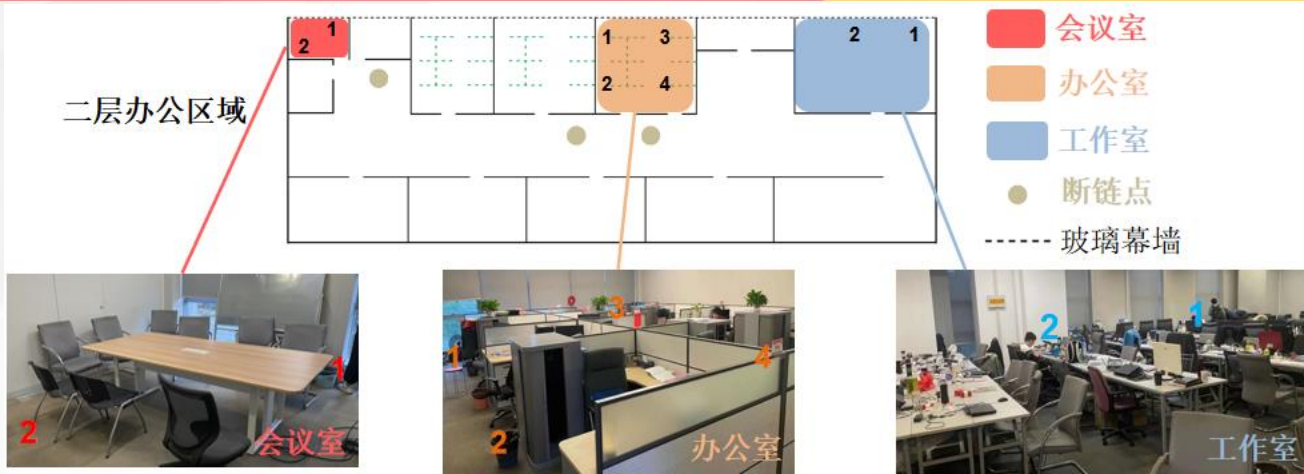


	SS-RSRP		SS-SINR		吞吐量	
	5%	50%	5%	50%	5%	50%
无RIS	-102.18	-94.93	-11.87	-6.25	4.75	91.50
部署RIS	-98.15	-91.13	-11.70	-6.01	3.25	109.00

覆盖：部署RIS后，RSRP有一定提高，边缘用户平均提高4.03 dB，用户平均RSRP覆盖提高3.8 dB；

吞吐量：部署RIS后，用户平均吞吐量抬升约17.5 Mbps，提升约19%；

SINR：部署RIS前后，SINR无明显差异，或是RIS在反射时同步放大邻区干扰信号所致。



## 四层超市



测试地点	无RIS			部署RIS			吞吐量性能变化
	RSRP	SINR	Throughput DL	RSRP	SINR	Throughput DL	
二楼会议室定点1	-108.31	1.57	67.85	-98.28	3.45	92.87	37%
二楼会议室定点2	-109.05	4.34	70.21	-99.29	5.07	142.06	102%
二楼办公室定点1	-104.46	-2.96	109.68	-96.99	1.15	247.45	126%
二楼办公室定点2	-110.35	-1.1	70.72	-100.57	5.32	155.39	120%
二楼办公室定点3	-111.54	-2.87	58.69	-97.78	4.69	127.39	118%
二楼办公室定点4	-102.3	3.46	132.64	-98.36	4.63	137.67	4%
二楼工作室定点1	-100.34	1.95	64.3	-102.26	1.82	50.94	-20%
二楼工作室定点2	-104.88	3.01	54.4	-101.43	0.25	63.64	17%
四楼超市定点1	-109.43	-0.24	64.38	-92.43	6.21	161.63	151%
四楼超市定点2	-106.35	2.51	71.08	-102.58	1.75	207.73	192%
四楼超市定点3	-114.58	-0.75	47.68	-102.35	-1.67	134.17	181%
四楼超市定点4	-114.17	-4.24	71.74	-102.55	-2.17	144.4	101%

对大楼内共十个定点进行了稳定传输测试，该测试版本的RIS室外覆盖室内穿透能力较弱，测试场景反射信号仅能穿透一堵玻璃幕墙（损耗约6~7 dB），无法再穿透室内环境的一堵内墙；

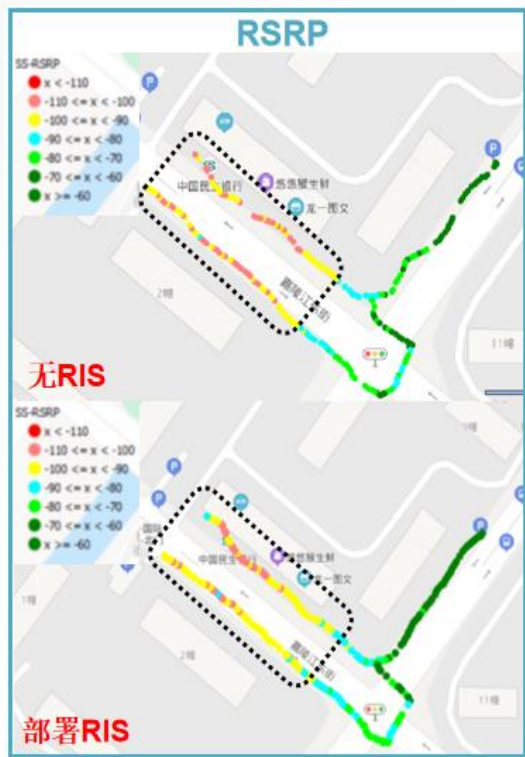
部署RIS后，大部分定点的性能均有提升，平均各点RSRP提高10 dB、速率提升78.19 Mbps；

各定点提升差异较大，或受信号波动及RIS覆盖范围有限所致。



红色阴影标记部分即覆盖延伸区域

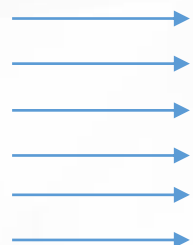
部署RIS对边缘用户影响明显，边缘用户RSRP提升约3.3 dB，边缘用户SINR提升1.45 dB，边缘吞吐量提升约 79 Mbps；  
部署RIS后，覆盖距离延伸约60米。



Base station antenna



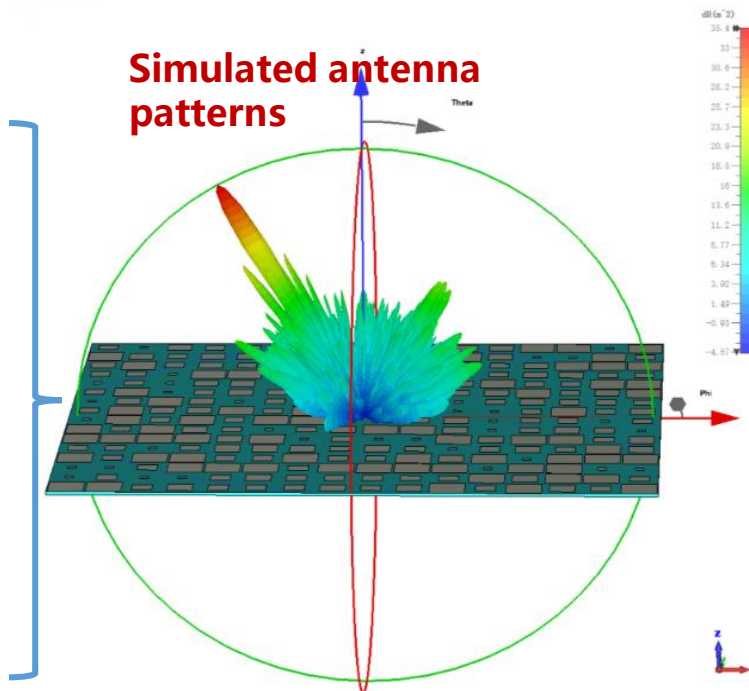
Air Interface



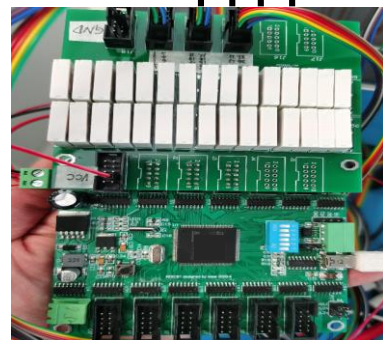
RIS panel



Simulated antenna patterns



Mobile



RIS controller



Server



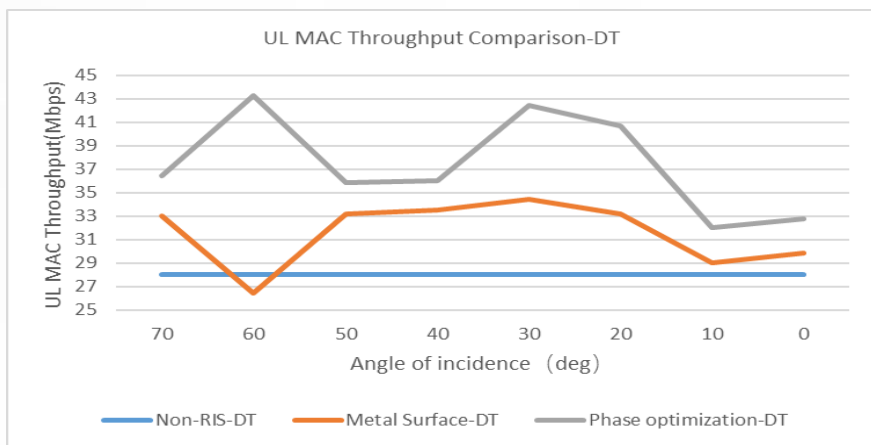
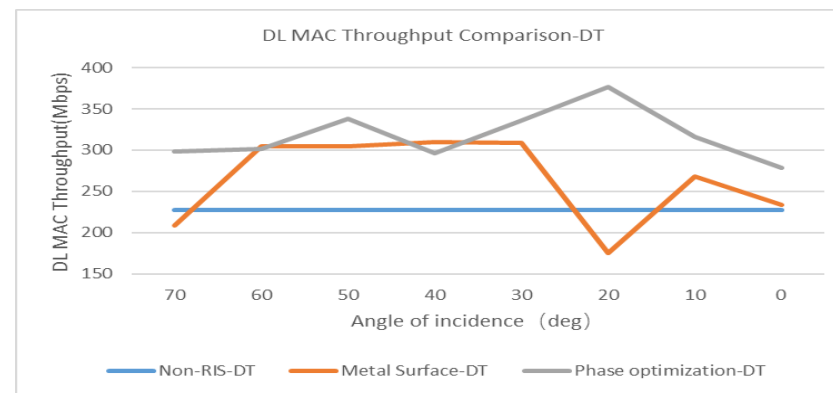
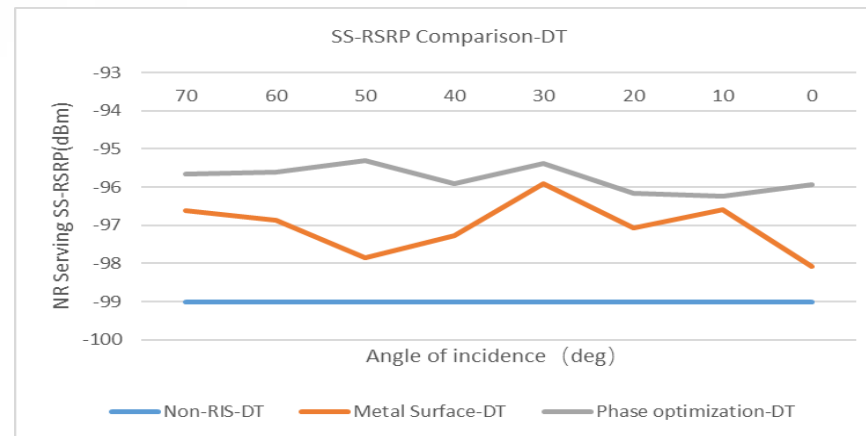
Server

Optimized phases

Time Synchronization

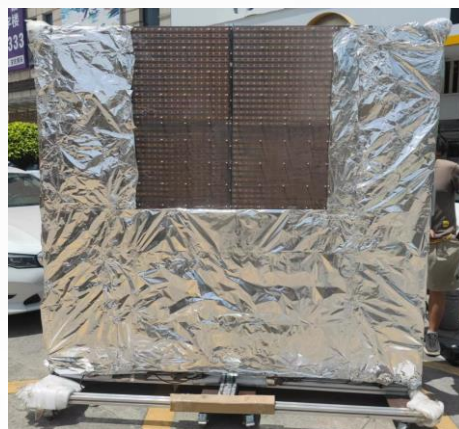
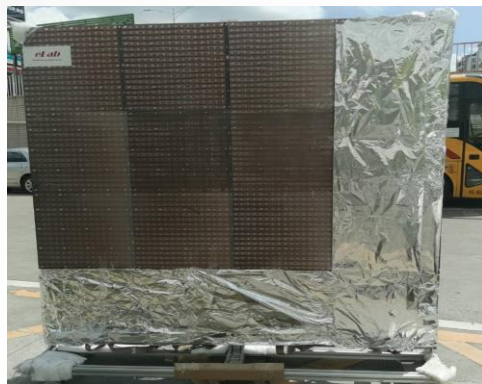
1. Synchronize data collection
2. Phase optimization via CSM algorithm

\* 与深圳移动、华为、港中文深圳联合



- 上下行RSRP & 上下行速率增益中, 30度增益最大;
- 上下行增益相当, 反射面介入后TDD网络依然保留上下行互易性;

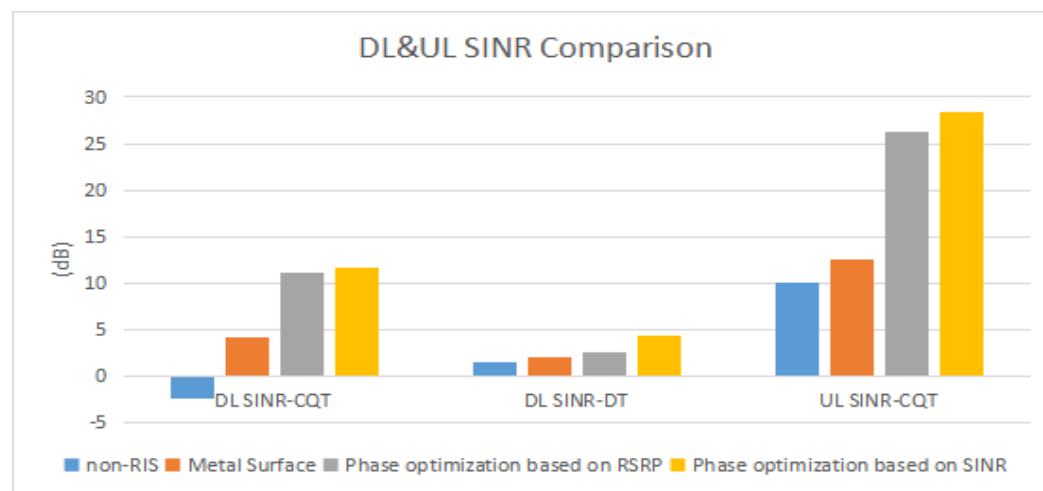
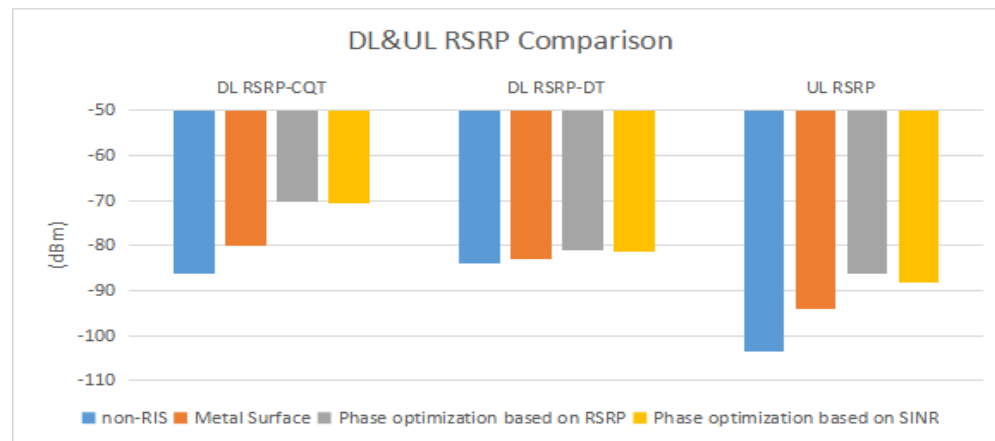




RIS大小	RIS单元数	RIS面积 (m <sup>2</sup> )	影响范围 (m <sup>2</sup> )
4*4	256	4	800
3*3	144	2.25	700
2*2	64	1	300~700
1*1	16	0.25	250~400



在干扰场景下，基于SINR寻优相位的MAC层速率增益大于基于RSRP寻优相位



- RIS部署场景应以宏网的覆盖增强和容量提升、以及室内覆盖增强为主，中低频段为重点
- RIS信道的测量与建模建议在3GPP Rel-19开展，以TR 38.901为基础
- 超材料器件自身存在多种非理想特性，在不断提高硬件性能同时，需要在控制部分进行一定补偿
- RIS空口设计需要考虑工程实际，尤其在信道估计和反馈方面，应以波束赋形/扫描为主
- RIS有望在毫米波小基站上得到部分应用
- RIS标准化应循序渐进，多步骤开展，以Rel-18网络控制直放站（NCR）为前奏，以Rel-19的RIS信道建模为基础，为Rel-20的6G RIS空口技术研究做准备，并结合RIS硬件及控制器的发展
- RIS器件研究取得初步成果，例如单元等效建模、波束上下行互易性、低功耗忆阻材料RIS、双极化RIS器件的必要性等
- RIS的大尺度系统仿真验证了RIS对小区平均吞吐和边缘吞吐的提升
- 在南京和深圳的5G现网R测试验证了RIS对上行和下行信号功率、信噪比、吞吐量的提升



**Thanks for your attention**