

MIMO系统中的多天线设计

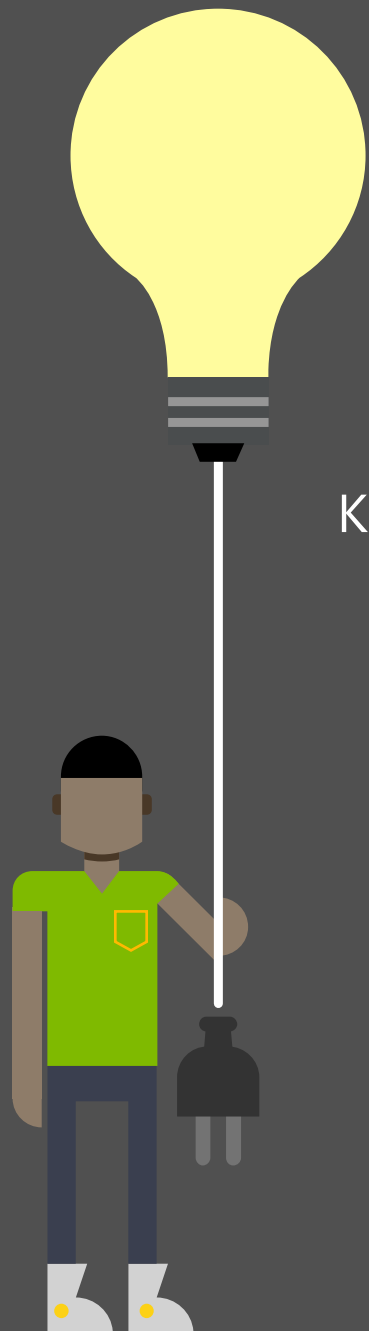
-第五讲

Multiple Antennas for Base Stations

Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, China

赵鲁豫, 博士, 副教授, 博士生导师

中国通信学会高级会员,
中国通信学会天线与射频技术专委会委员,
天线系统产业联盟理事,
IEEE Senior Member



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY



Meta / mimo / multifunction
Antenna
Design



5G基站天线的发展概况和需求分析

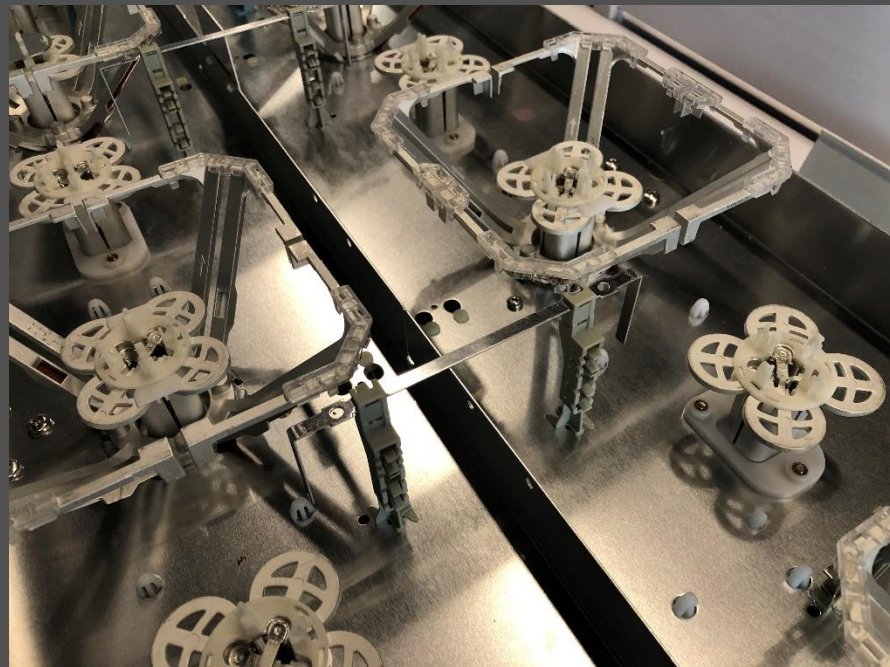
基站天线的基本概念

基站天线的指标

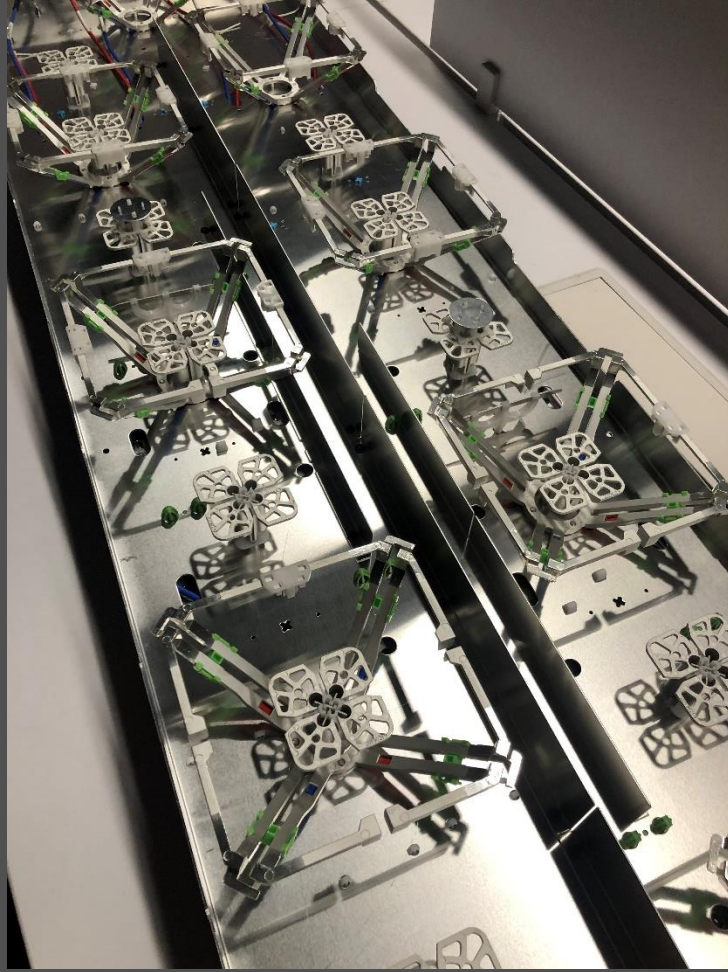
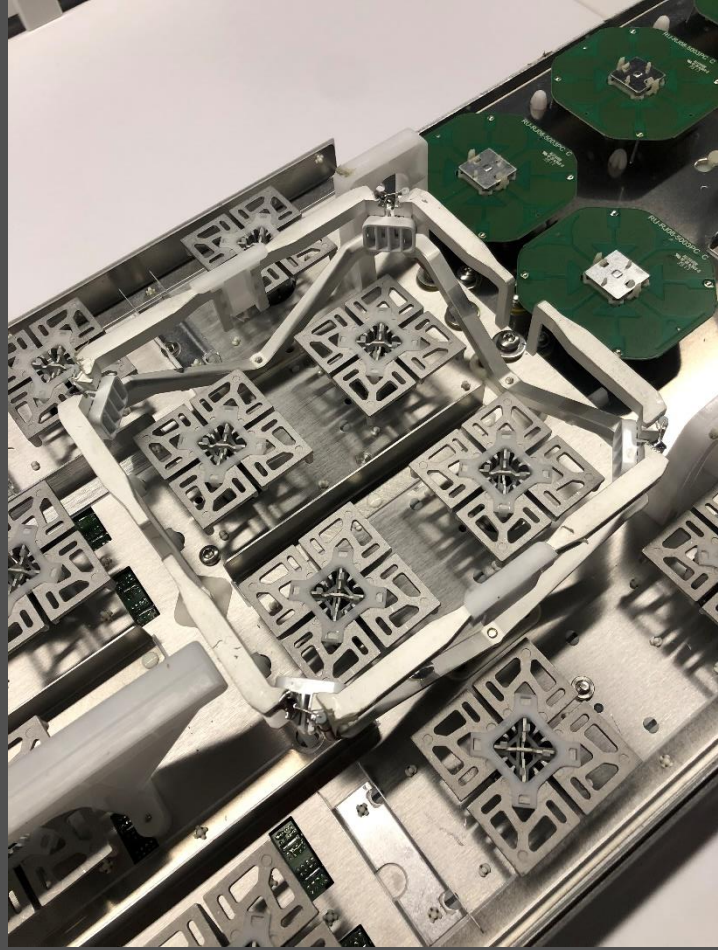
基站天线的设计

基站天线去耦合设计

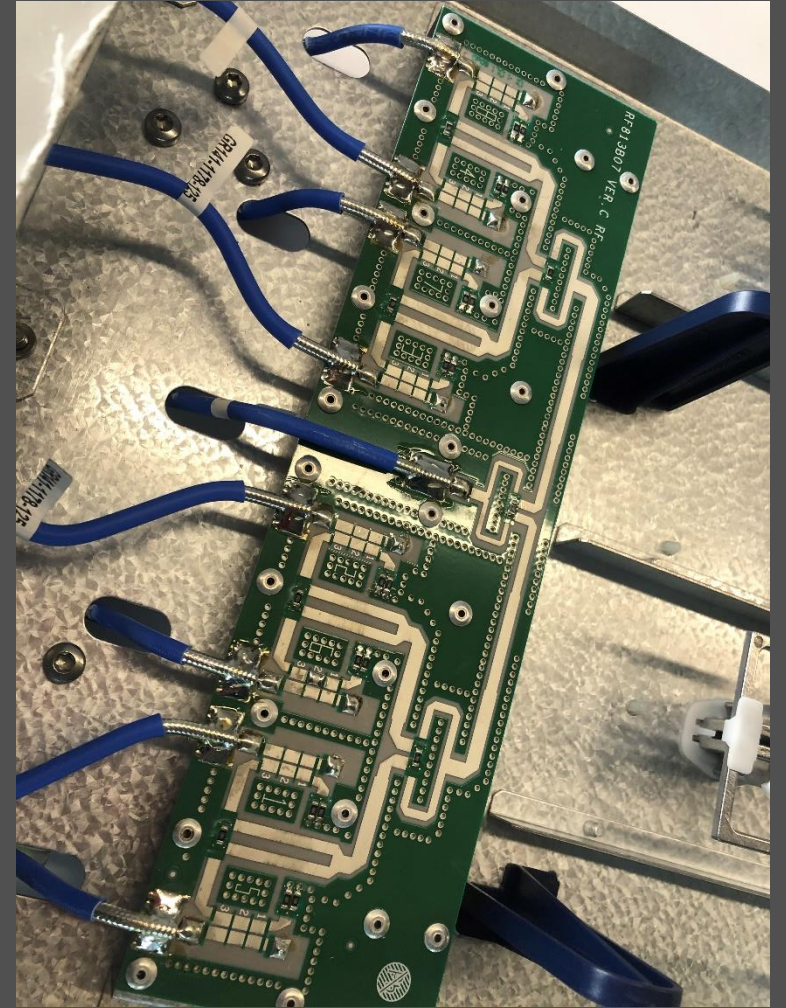
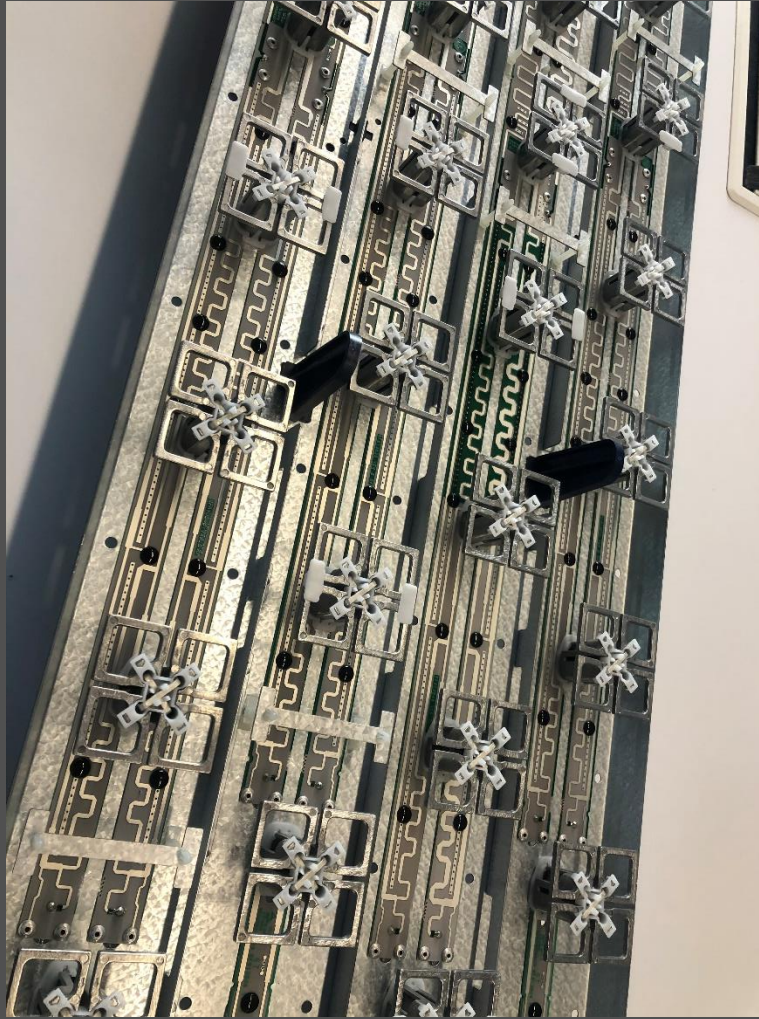
基站天线赏析1



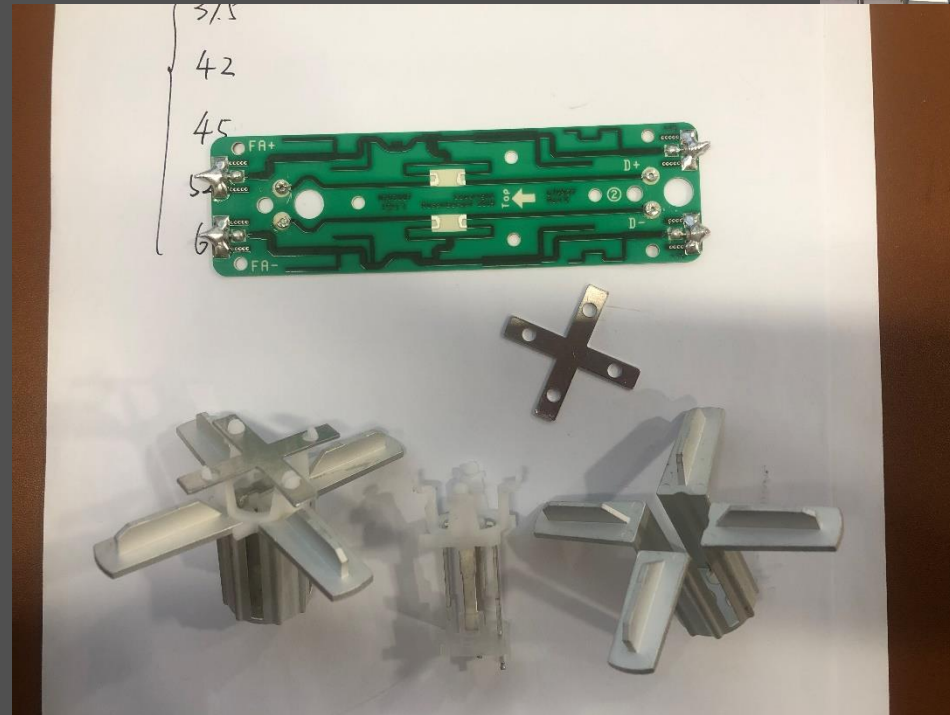
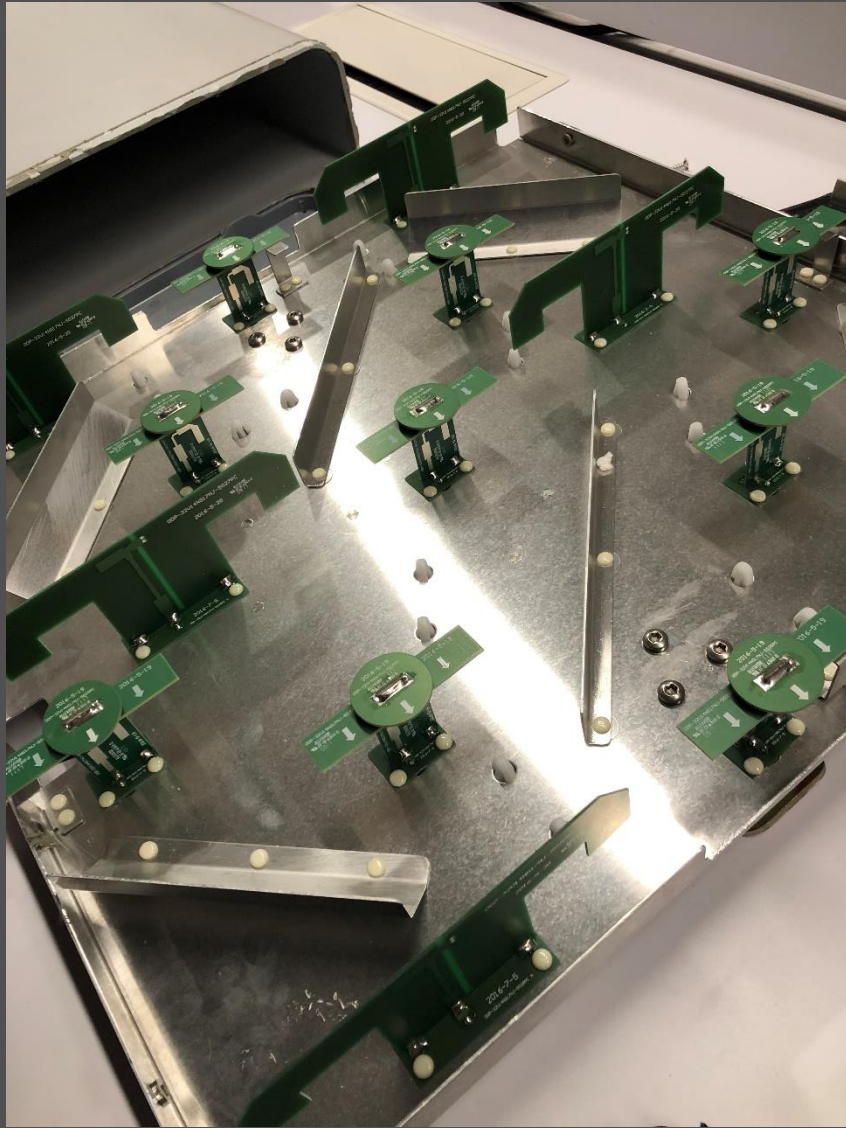
基站天线赏析2



基站天线赏析3



基站天线赏析4

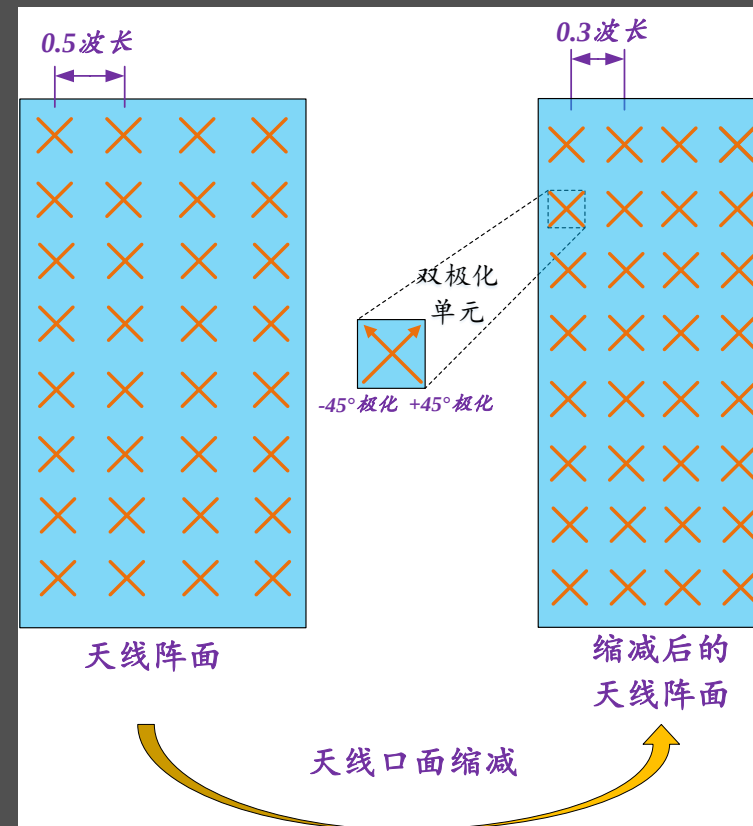




1

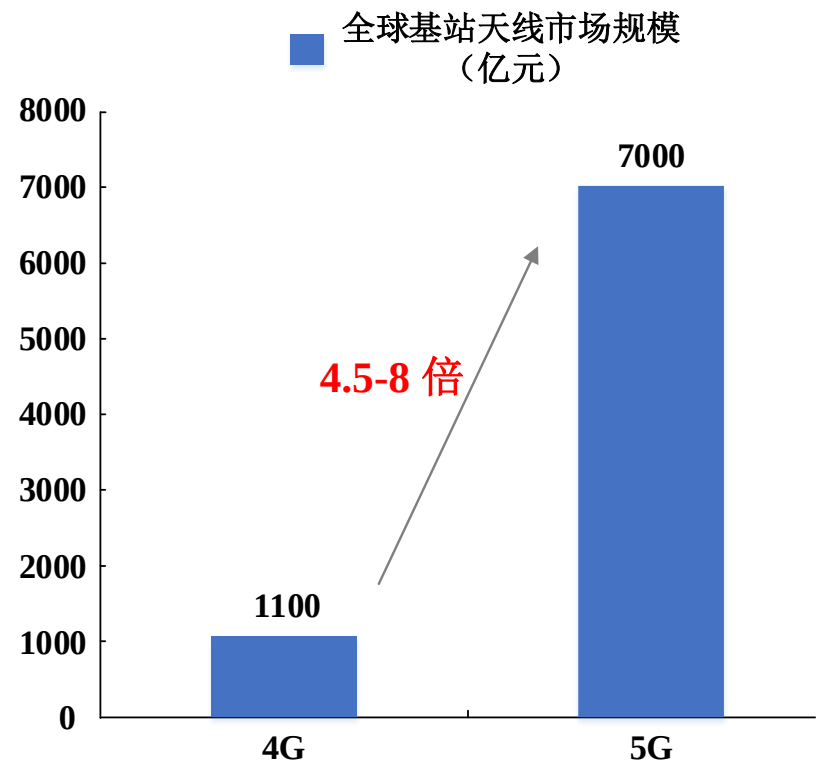
5G基站天线的发展概况和需求分析

背景与需求分析



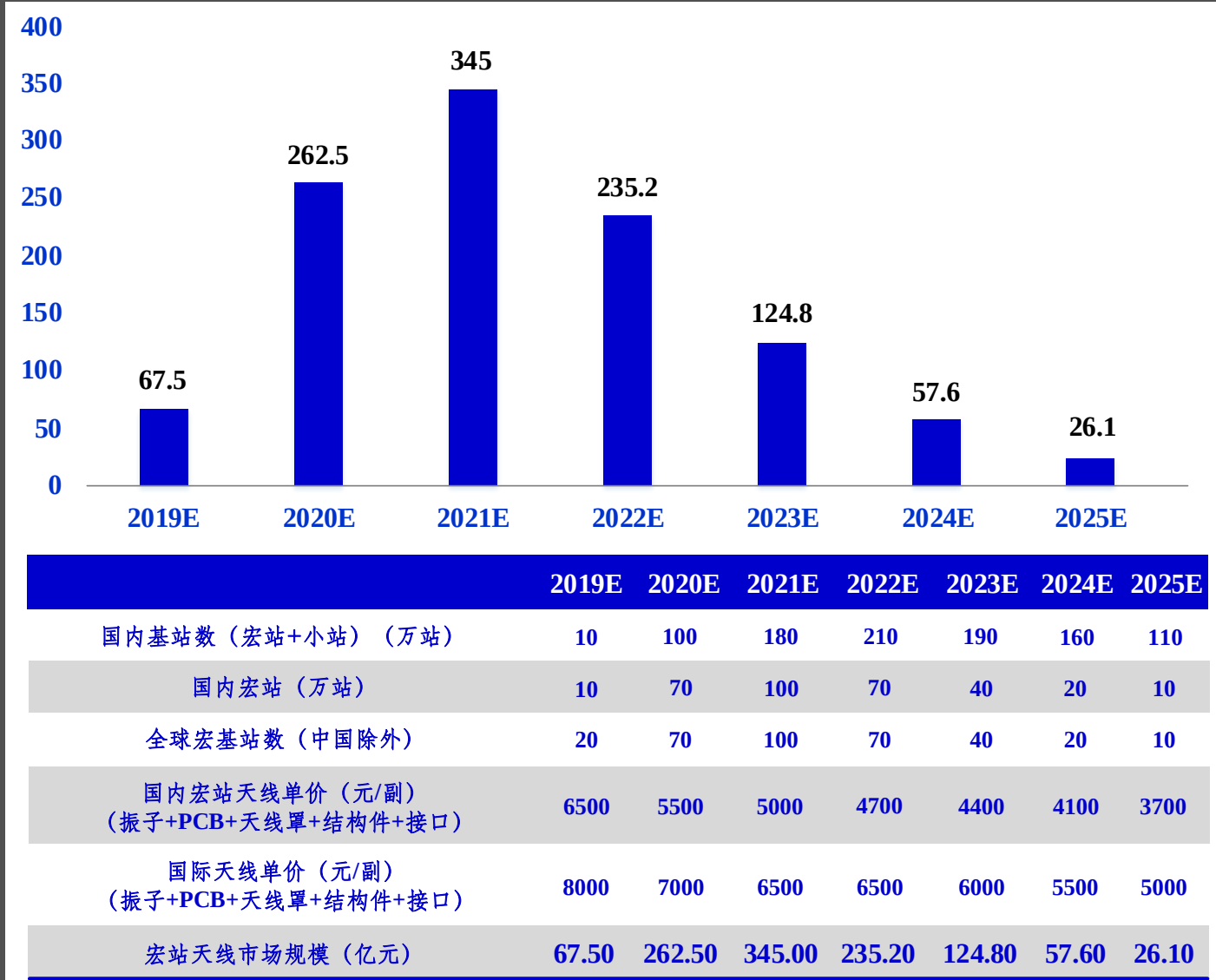
- 新基建促进5G各类基站快速建设
- 新增基站数量巨大，占用铁塔空间
- 5G基站天线数目激增到上百个
- 实际架设环境不允许天线尺寸增加
- 天线口面由于风阻、重点等要求缩减至少30%
- 天线耦合急剧增加，急需去除耦合降低干扰

市场与产业前景分析

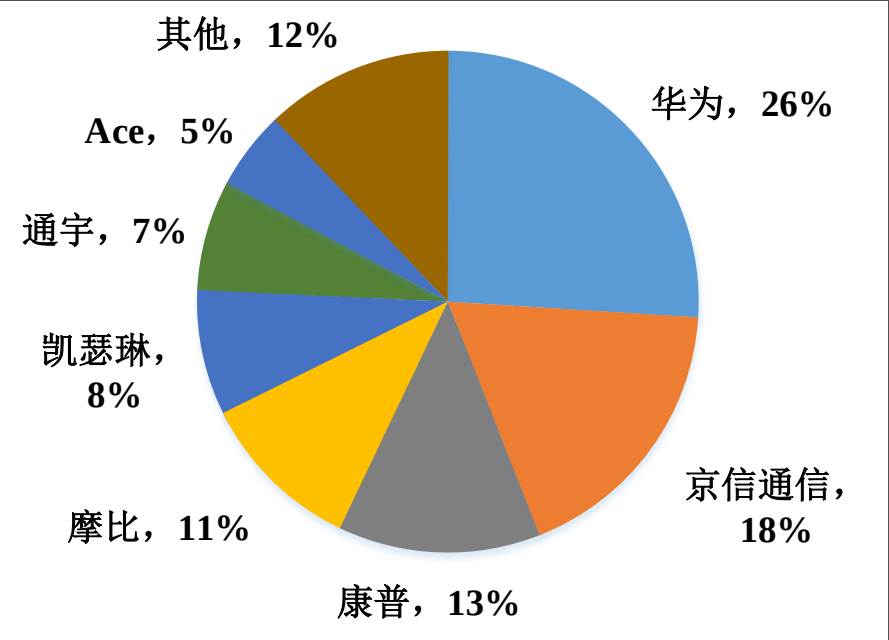


2020-2025年全球天线市场:

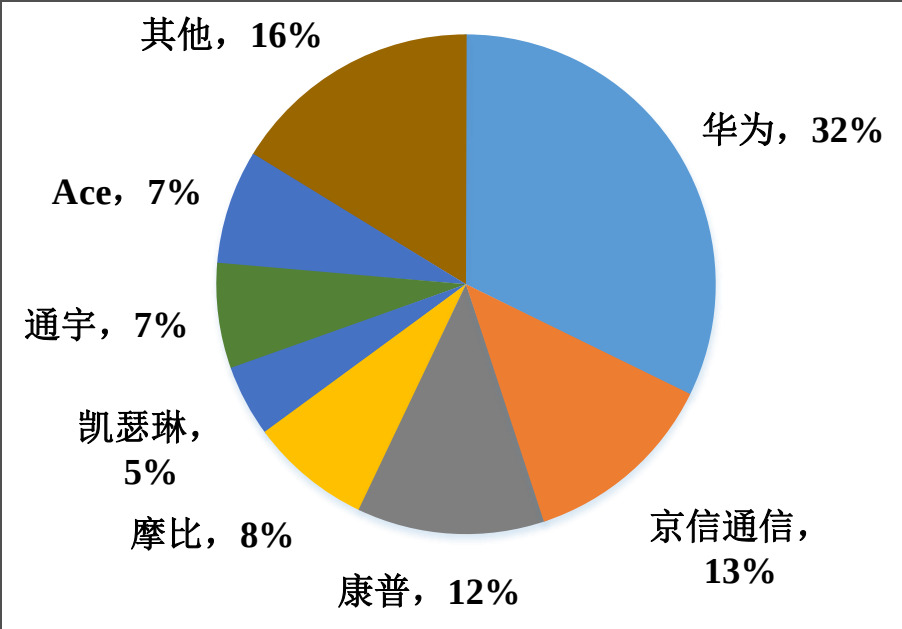
1. 天线总需求数千亿
2. 5G比4G天线需求增加4-8倍
3. 天线产品成本降低需求迫切



基站天线行业知名厂商



2017



2019

全球天线厂商：

- 1. 国外厂商：Commcope Kathrein ACE等
- 2. 国内厂商：华为，京信，中兴，通宇，虹信，凡谷，盛路，摩比，中天，海天，健博通，粤海信等



2

基站天线的基本概念

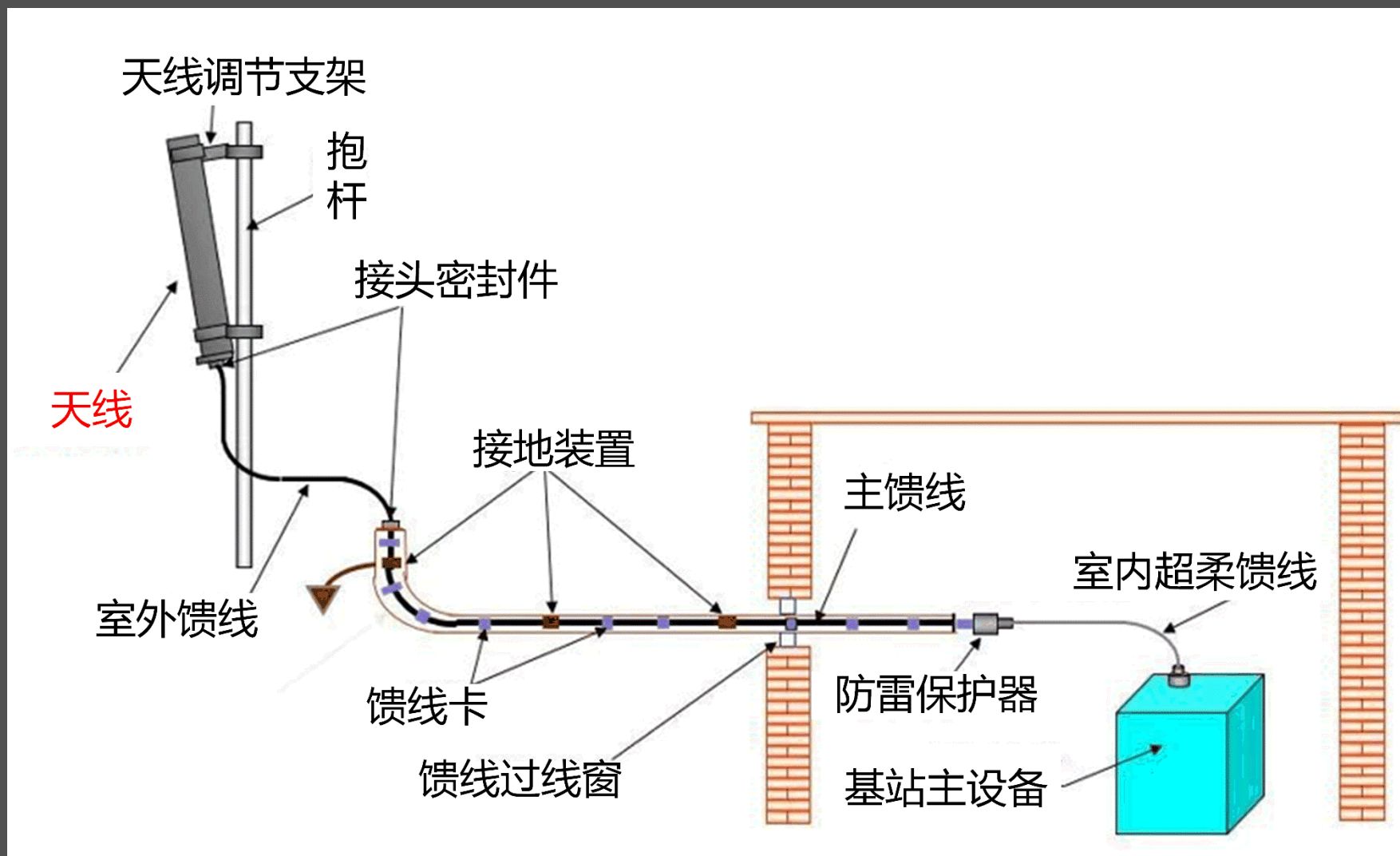
基站天线概述

什么是基站天线?

►移动通信系统中发射和接收信号的装置



基站天馈系统的组成



基站天线的种类

➤根据移动通信系统来划分：

2G/3G/4G/5G基站天线

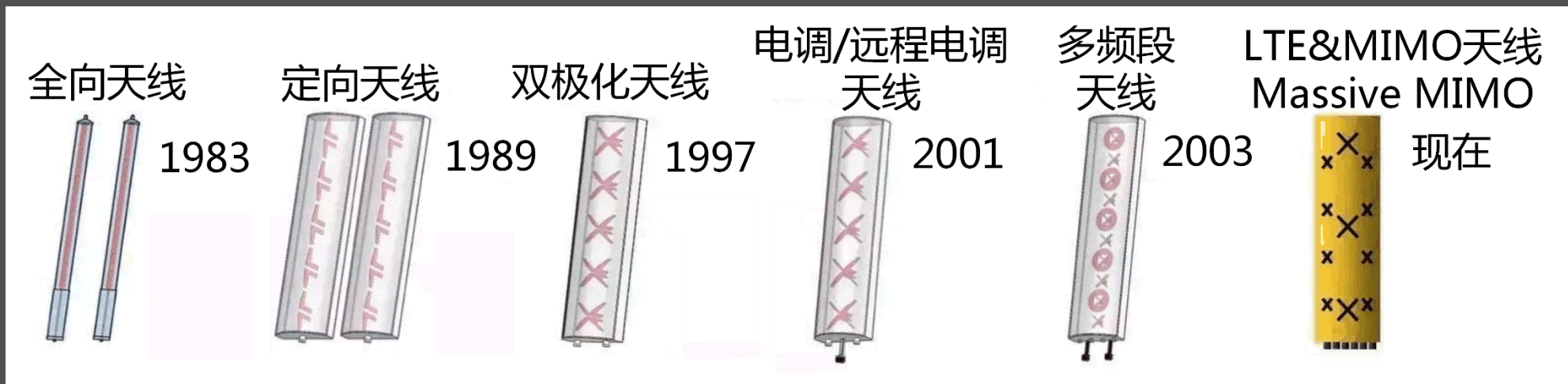
➤根据应用场景来划分：

扇区基站天线、全向基站天线、窄波束天线、多波束天线

➤根据频率带宽来划分：

窄带基站天线、宽带基站天线

基站天线演进历程



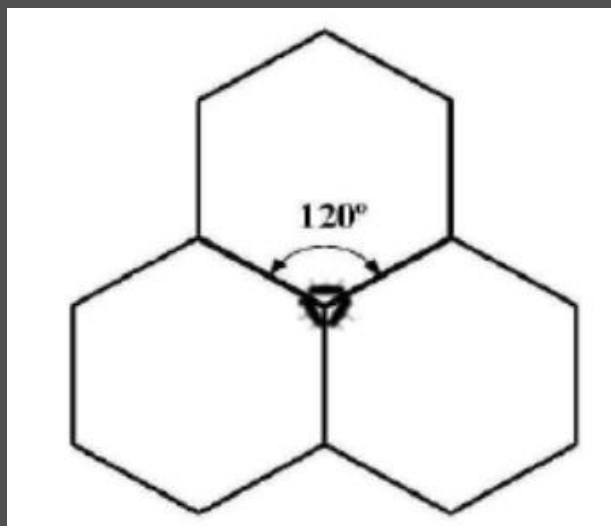
- 第一代移动通信基站几乎用的都是全向基站天线，天线类型以单一极化的单极子或偶极子天线为主，在接收空间上实现分集
- 到了第二代移动通信技术，人们才进入了真正意义上的蜂窝网络时代，而这一阶段的基站天线逐渐从全向天线演变成了定向天线的形式，基站天线的波束宽度通常有 60° 、 90° 和 120°
- 1997年，双极化天线（ $\pm 45^\circ$ 交叉双极化天线）开始走上历史舞台，此时基站天线的性能相比上一代有了很大的提升，目前不论是3G、4G还是5G，基站天线的形式均以双极化天线为主
- 到2013年，MIMO技术被引入基站系统的设计中并被大规模推广应用，与之对应的基站天线也从最初的单个天线（阵列）发展到多天线（阵列），如 4×4 MIMO基站天线架构。MIMO技术成倍地提升了无线通信的容量，也使基站天线进入了一个新的时代
- 目前5G时代在推进的大规模天线阵列（Massive MIMO）技术也是基于传统MIMO基站天线的技术升级和突破，利用大规模天线单元的空间自由度及有效的多径分量形成多波束覆盖，极大地提高了移动通信系统的频谱利用效率和终端用户的网络体验。

基站天线的种类

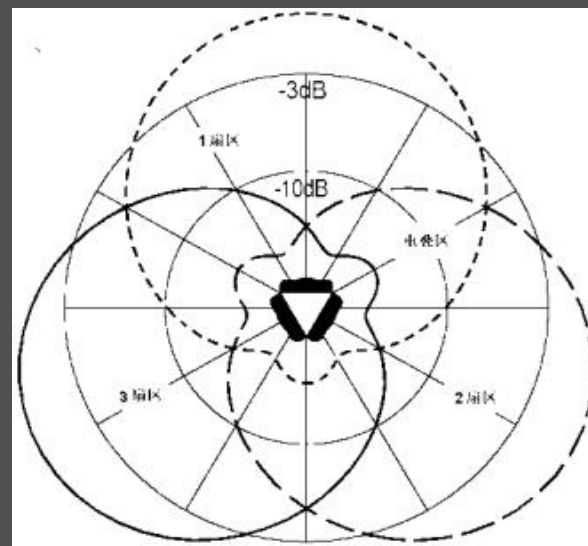
基站天线的种类

➤扇区基站天线

水平半功率波束宽度为 65° 左右的基站天线

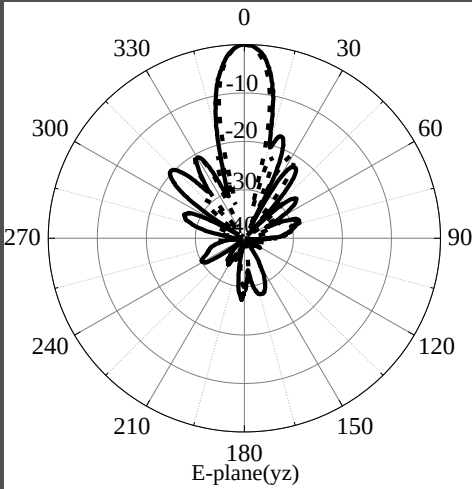
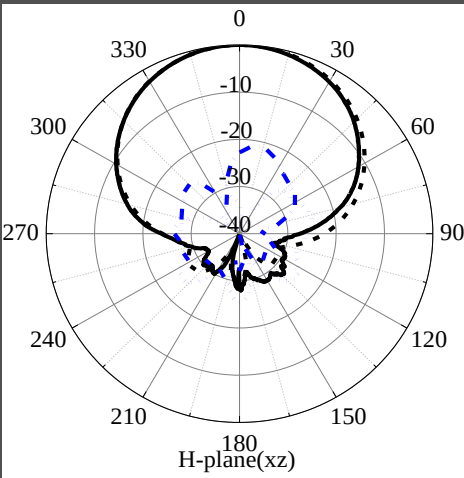
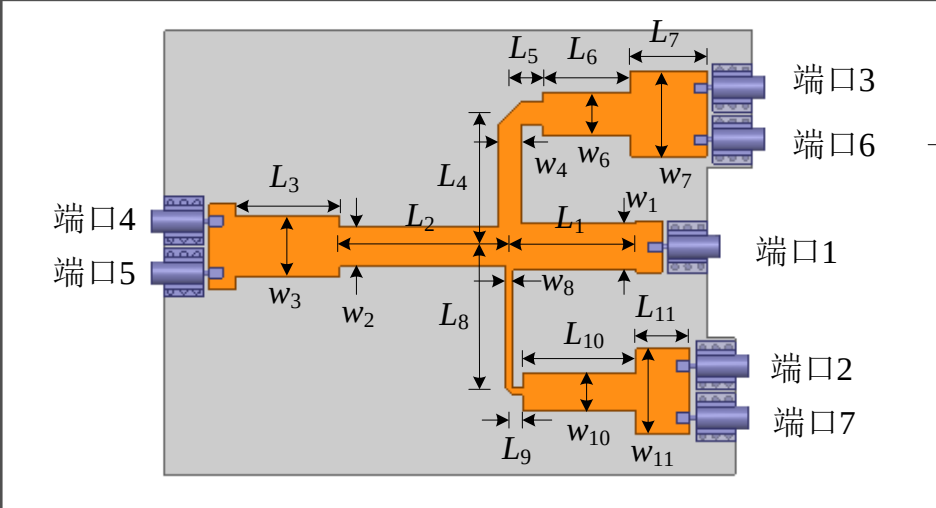
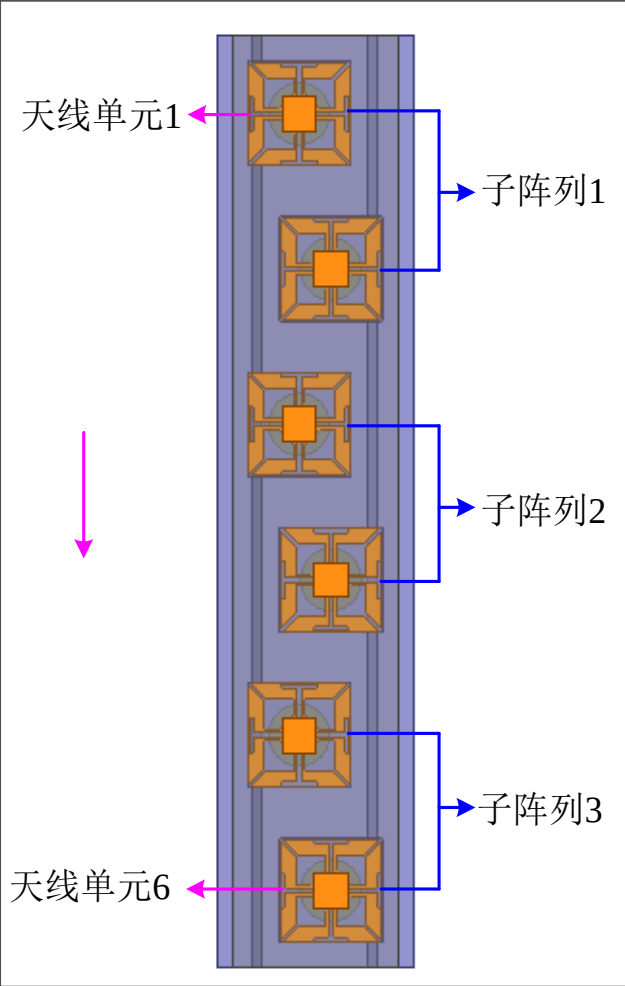


蜂窝小区



三扇区覆盖方案

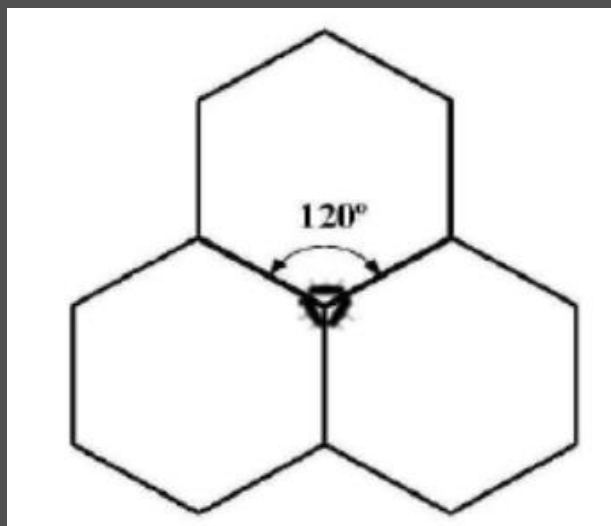
扇区基站天线



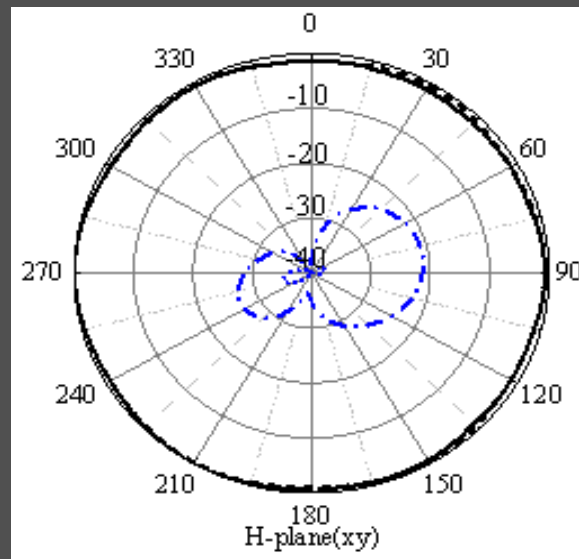
全向基站天线

➤全向基站天线

水平半功率波束宽度为 360° 的基站天线

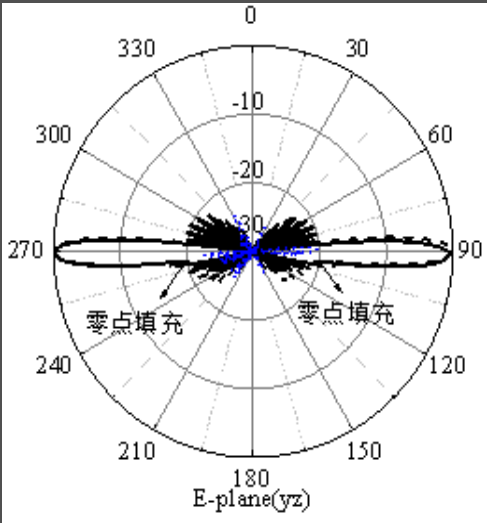
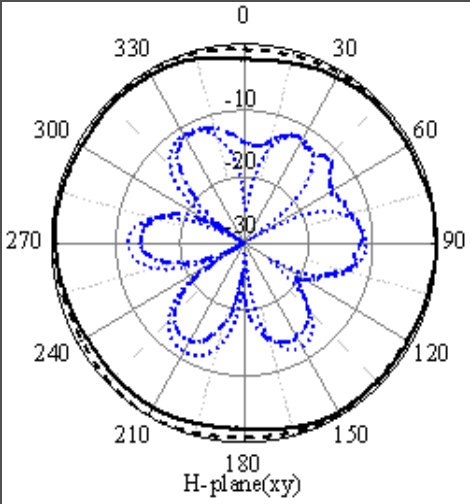
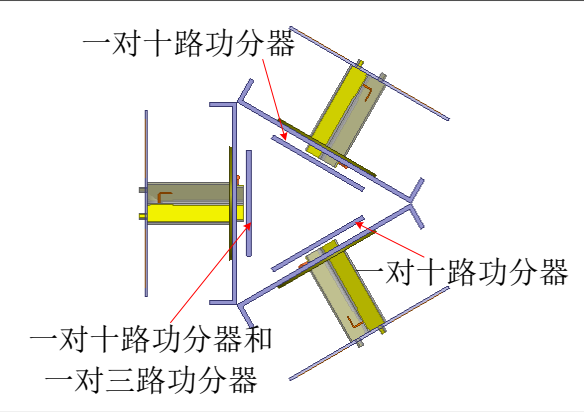
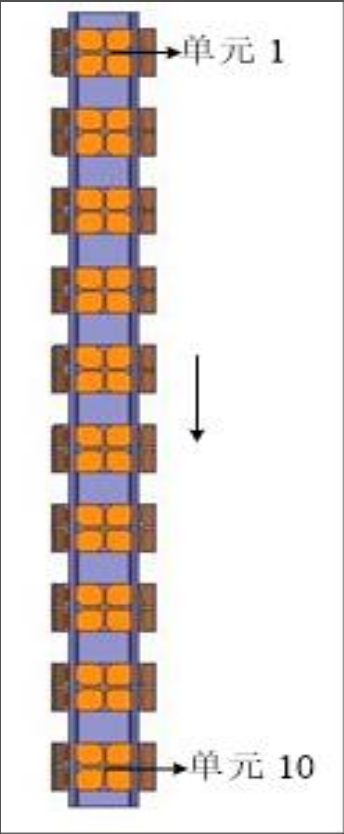


蜂窝小区



全向覆盖方案

全向基站天线



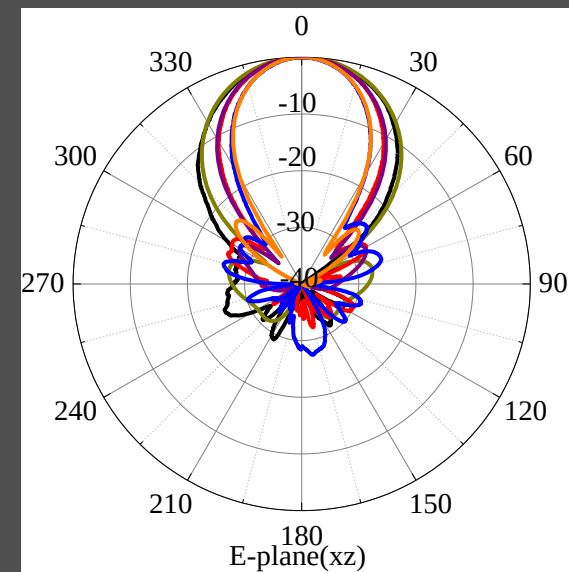
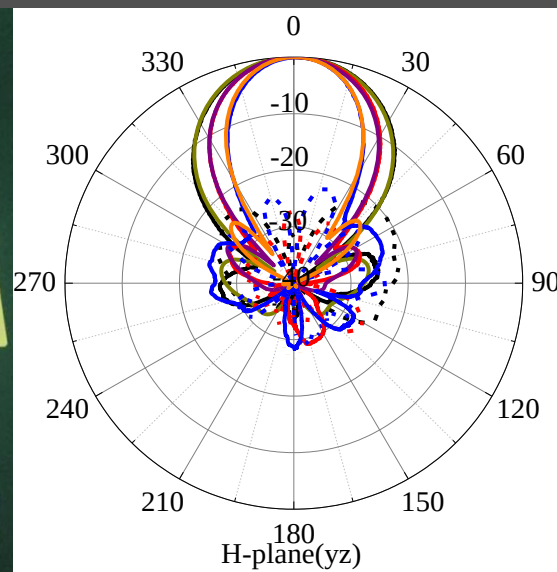
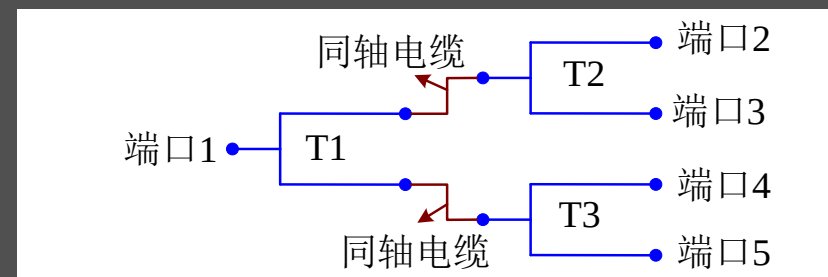
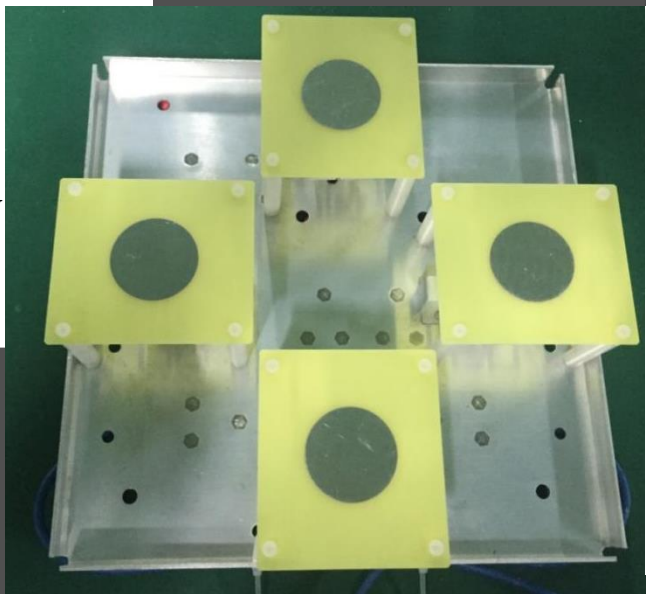
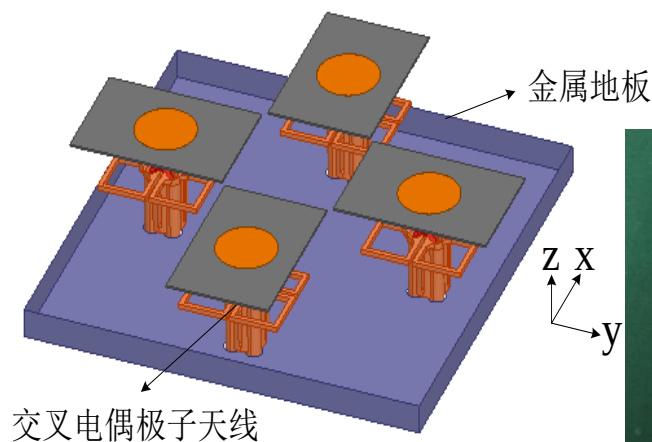
窄波束基站天线

➤窄波束基站天线

水平半功率波束宽度为 32° 左右的基站天线

➤应用场景

通信区域较窄的场合，如隧道、电梯、场馆



多波束基站天线

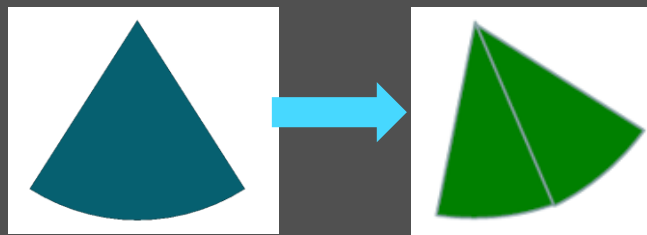
➤多波束基站天线

在水平面辐射产生多个波束的基站天线

➤多波束天线能大幅度地提高通信容量

单波束天线

多波束天线

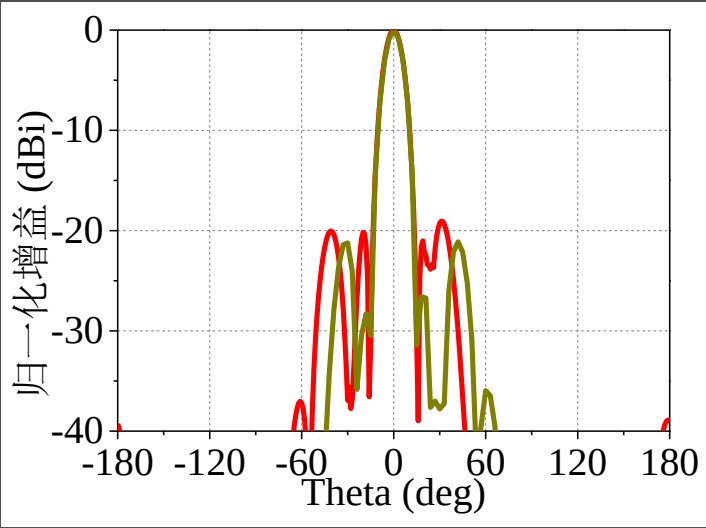
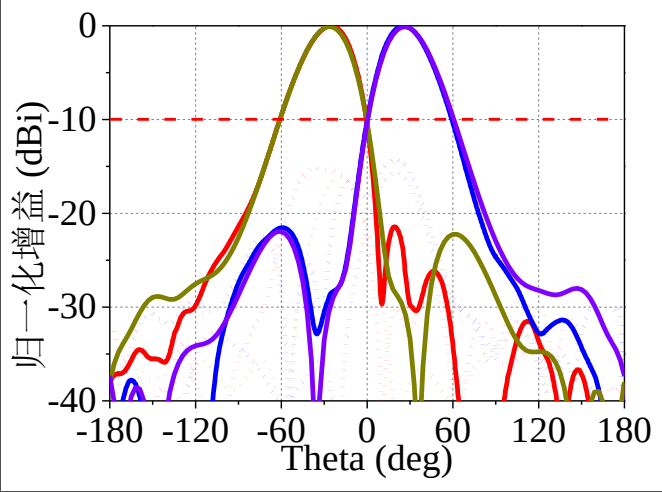
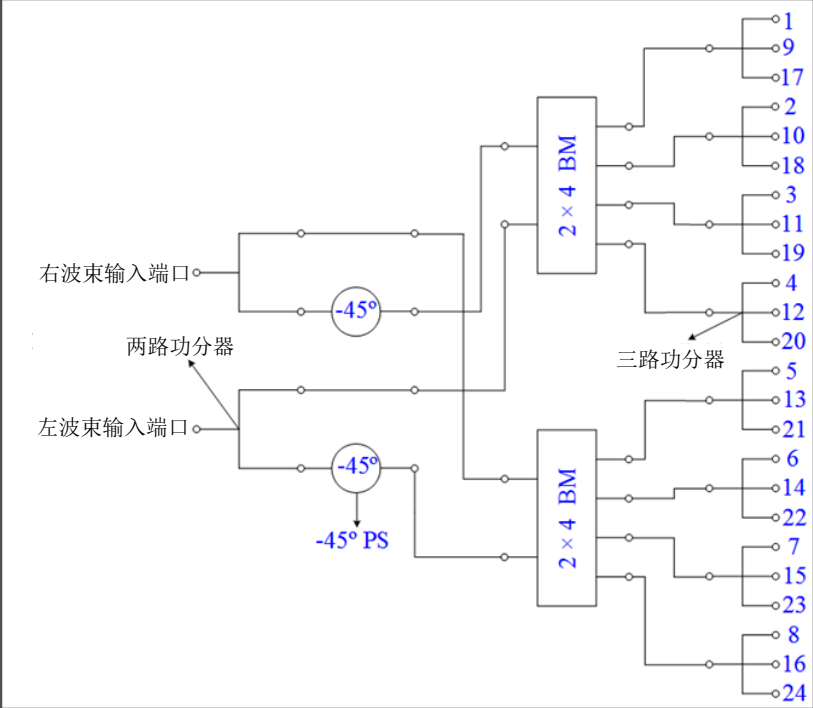


➤应用场景

人群密集的场所



多波束基站天线



基站天线的频段

➤ 第二代移动通信系统：

DCS1800:1710-1880 MHz； GSM1800:1710-1850 MHz

GSM900:890-960 MHz； CDMA:825-880 MHz

➤ 第三代移动通信系统：

移动TD-SCDMA： 1880-2025 MHz； 电信CDMA2000： 1920-2125 MHz

联通WCDMA： 1940-2145 MHz

➤ 第四代移动通信系统：

移动： 1880-1900MHz/2320-2370MHz/2575-2635MHz；

电信： 2370-2390MHz/2635-2655MHz； 联通： 2300-2320MHz/2555-2575MHz。

➤ 第五代移动通信系统：

移动： 2515MHz-2675MHz/4800MHz-4900MHz；

电信和联通： 3400MHz-3600MHz

基站天线的发展趋势

- 多频段基站天线
- 宽频带基站天线
- 小型化基站天线
- 滤波基站天线



3

基站天线的指标

基站天线的指标

➤电气性能指标

包括电压驻波比、隔离度、三阶互调。

➤辐射性能指标

包括半功率波束宽度、增益、前后比、交叉极化比、旁瓣、极化。

➤机械性能指标

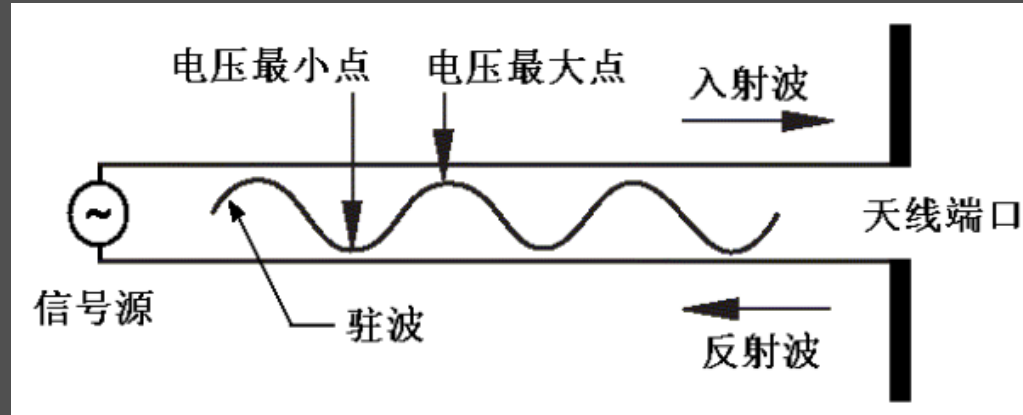
天线尺寸、重量、天线罩材料、

➤其他特性

功率容量、震动试验、环境试验

基站天线的指标

电气性能指标-匹配



➤反射系数 Γ ：反射波与入射波之比称为反射系数

$$\hat{\Gamma} = \frac{\hat{b}}{\hat{a}}$$

➤电压驻波比VSWR：传输线上的电压最大值与电压最小值之比

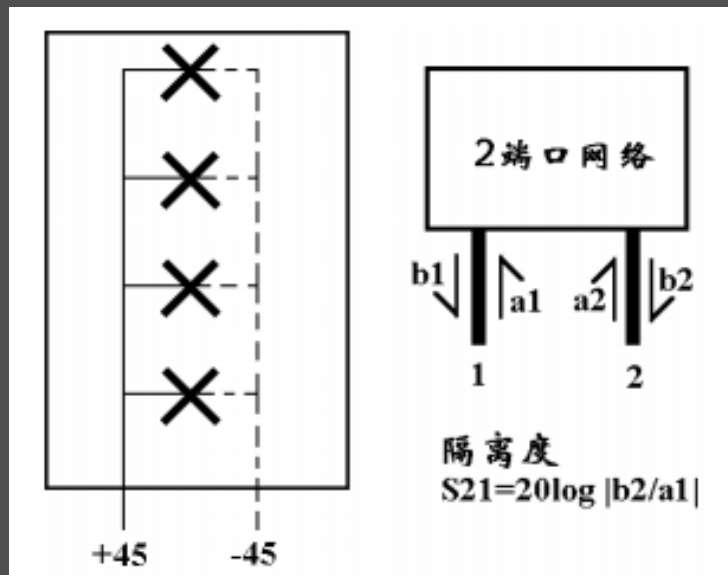
$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{|\hat{a}| + |\hat{b}|}{|\hat{a}| - |\hat{b}|} = \frac{1 + |\hat{\Gamma}|}{1 - |\hat{\Gamma}|}$$

➤回波损耗RL：采用反射系数复模的对数分贝来度量

$$RL = -20 \cdot \log_{10} |\hat{\Gamma}|$$

基站天线的指标

电气性能指标-隔离



➤ 隔离度定义为两个端口之间的传输系数 S_{21}

$$Iso = -20 * \log_{10}(|b_2|/|a_1|)$$

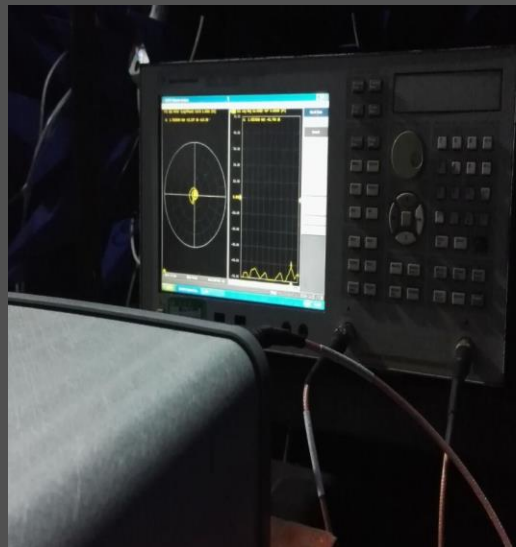
➤ 不同天线之间的隔离度跟天线之间的电磁耦合相关

基站天线指标的测试

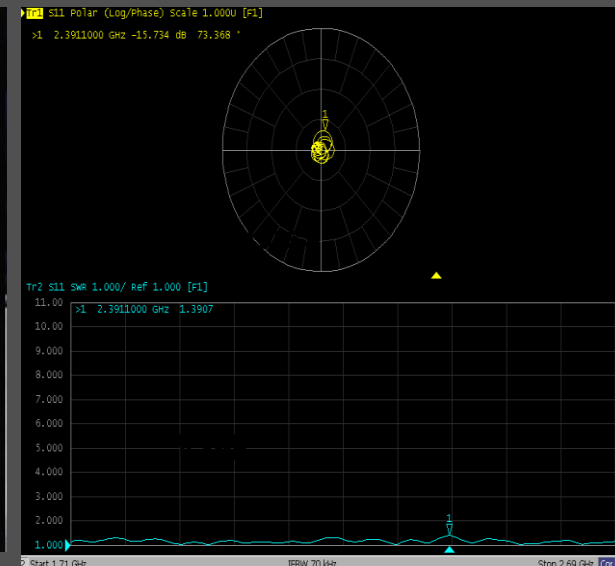
电气性能指标-测试设备



测试暗房



网络分析仪

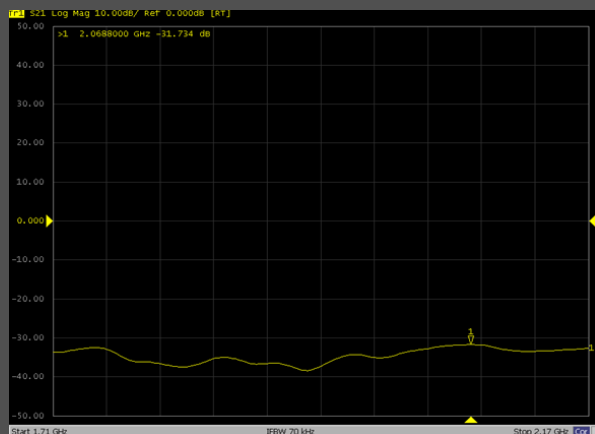


测试结果

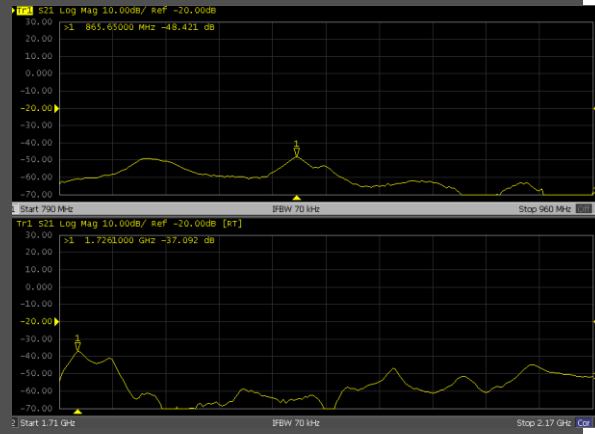
基站天线要求：VSWR：小于1.5，对于的RL大于14dB

基站天线指标的测试

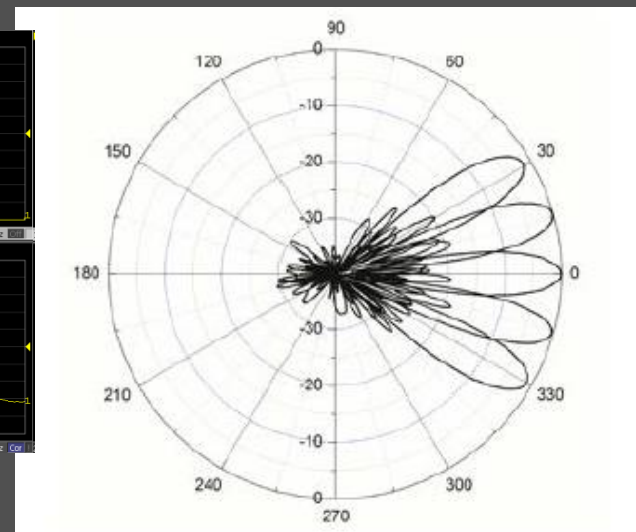
电气性能指标-测试设备



双极化之间的隔离



两个系统之间的隔离度



两个波束之间的隔离度

基站天线要求：极化、系统隔离大于28dB，波束隔离大于16dB

基站天线的指标

电气性能指标-三阶互调

➤ 有多个频率载波同时输送到天线时 $U_{in} = V_{1m} \cos(\omega_1 t + \theta_1) + V_{2m} \cos(\omega_2 t + \theta_2) + \dots$

➤ 由于天线内部金属互连时出现异质结构，从而引起非线性效应，

天线的输出 U_o 变成: $U_o = a_1 \cdot U_{in} + a_2 \cdot U_{in}^2 + a_3 \cdot U_{in}^3 + \dots$

➤ 其中 $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ 的频率分量为（无源三阶互调PIM3）：

$$\begin{cases} 3a_3 V_{1m}^2 V_{2m} \cos(2\omega_1 - \omega_2)t + \dots \\ 3a_3 V_{1m} V_{2m}^2 \cos(2\omega_2 - \omega_1)t + \dots \end{cases}$$

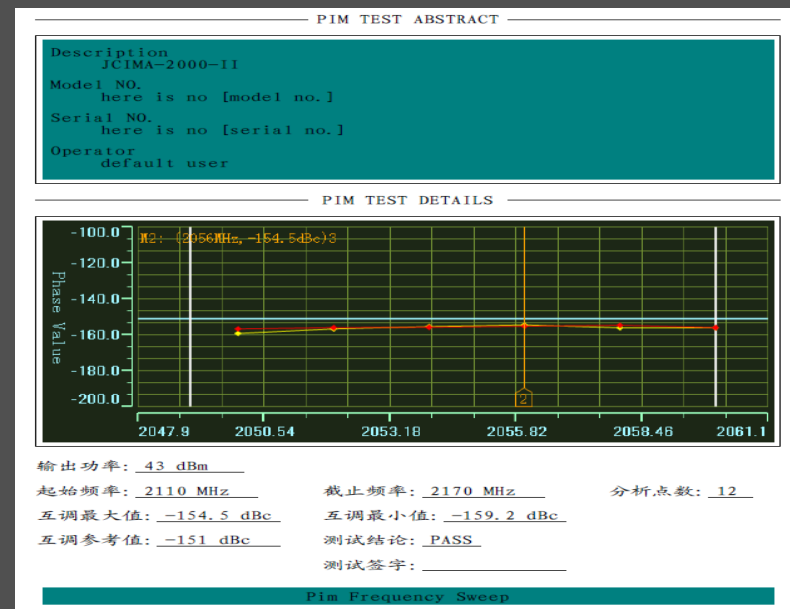
VSWR

➤ 当频率 f_1 和 f_2 输入到天线，天线辐射的信号包括 f_1 、 f_2 、 $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ 频段。

➤ 为了降低信号干扰，需要抑制 $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ 频段的信号。

基站天线指标的测试

电气性能指标-三阶互调



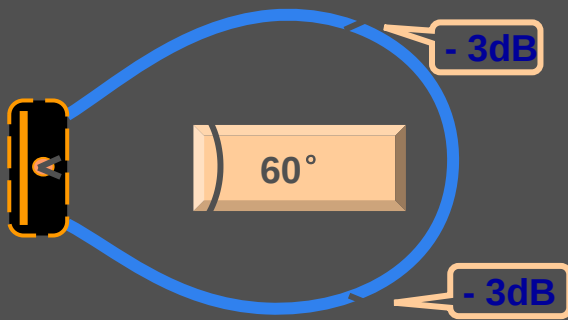
三阶互调必须在暗室和PIM测试仪中进行测试

基站天线要求: PIM3小于-150dBc (-107dBm)

基站天线指标

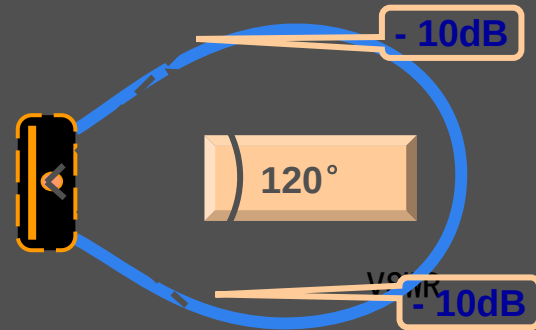
电辐射性能指标-波束宽度

- 半功率波束宽度：最大辐射方向功率密度下降至一半时的角域宽度，也称为3dB波束宽度。
- 10dB波束宽度：最大辐射方向功率密度下降至-10 dB时的角域宽度



3dB波束宽度

$65 \pm 5^\circ$



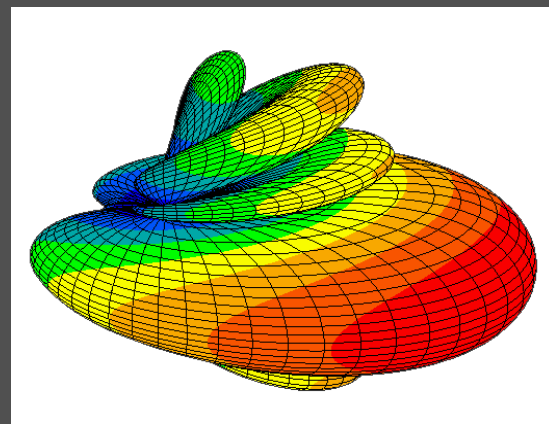
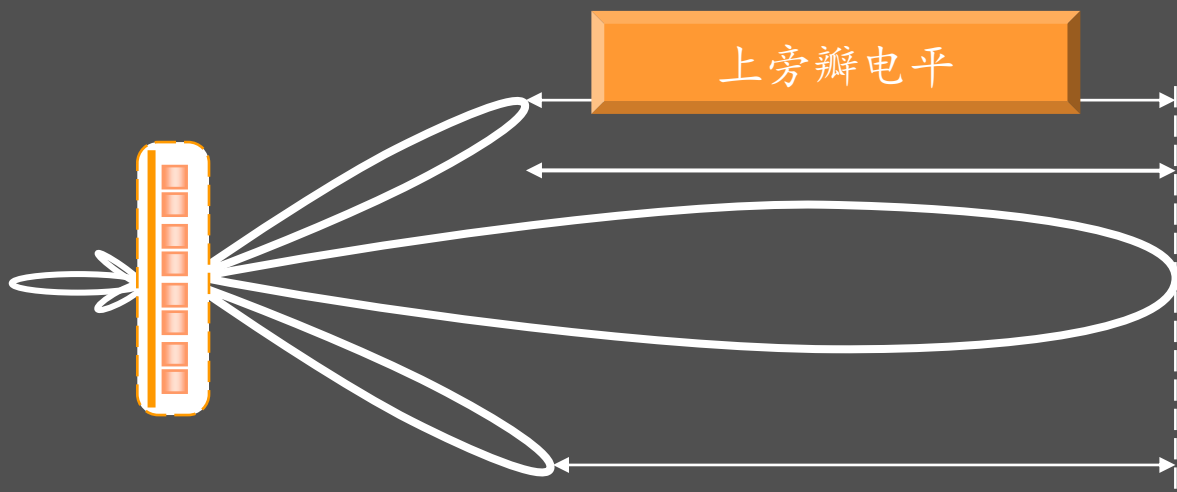
10dB波束宽度

$120 \pm 10^\circ$

基站天线指标

电辐射性能指标-旁瓣抑制

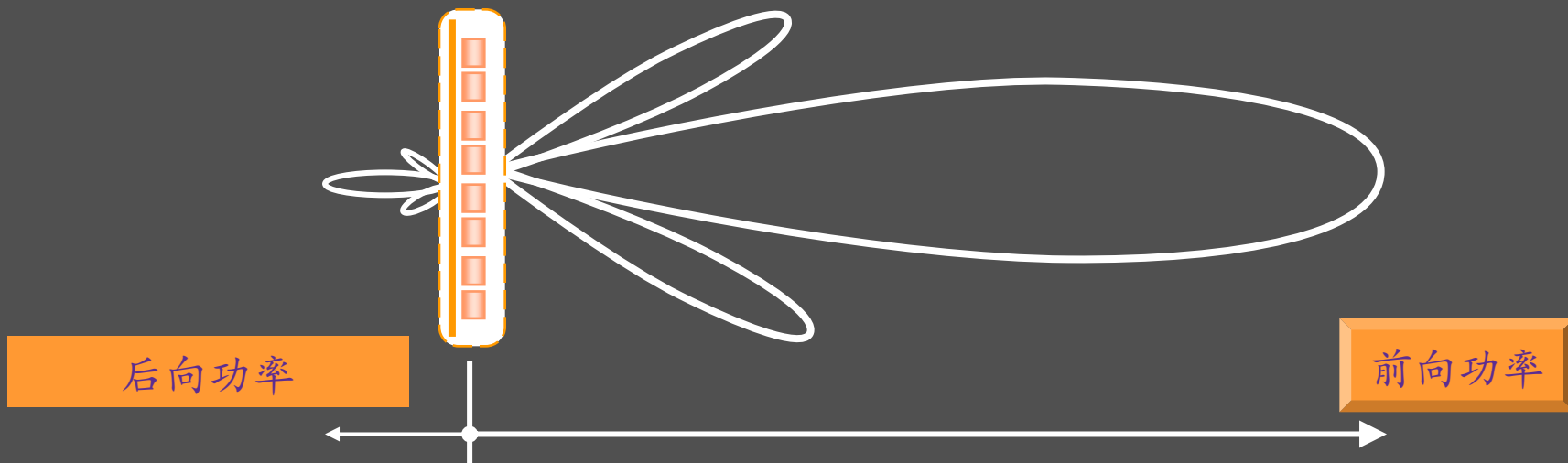
- 为了减小对相邻蜂窝小区的信号干扰，需要对上旁瓣进行抑制。
- 基站天线要求：上旁瓣电平小于-16dB。



基站天线指标

电辐射性能指标-前后比

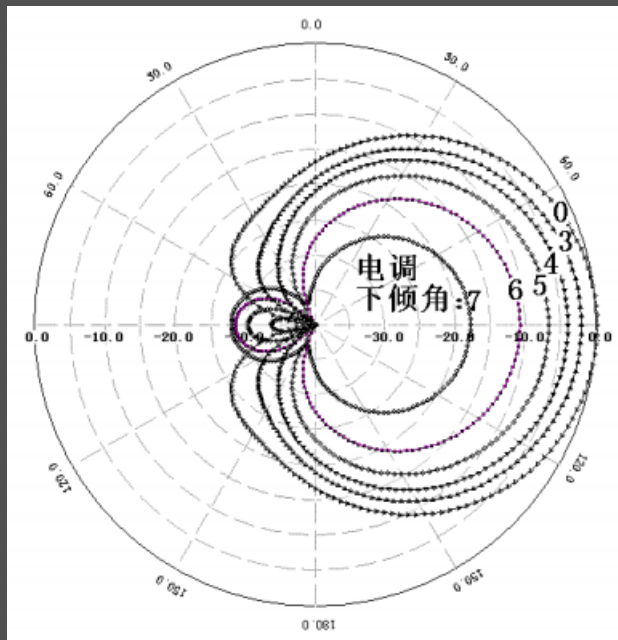
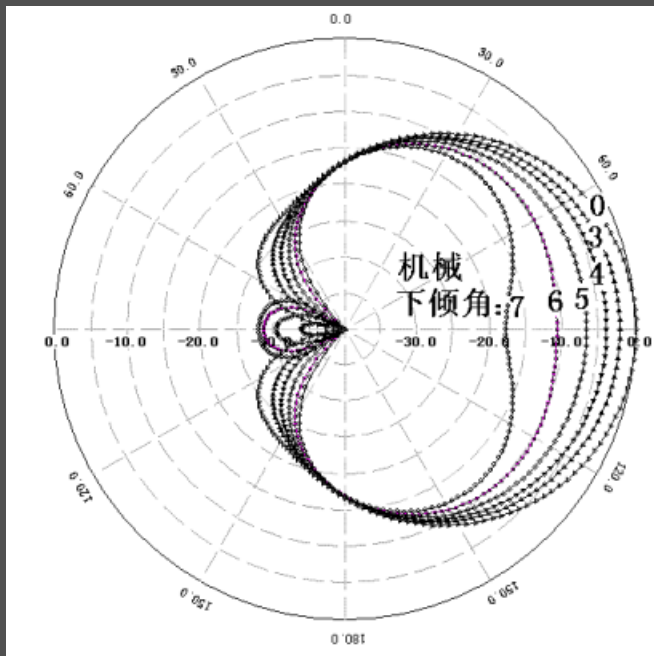
- 基站天线后瓣： $180^\circ \pm 30^\circ$ 区域内所有副瓣的最大电平定义为后瓣电平
- 前后比： 主瓣电平与后瓣电平的比值称为前后比
- 基站天线要求： 前后比大于25dB



基站天线指标

电辐射性能指标-电调下倾

- 机械下倾：机械下倾的电平没有同步下降，其边缘覆盖角域电平相对增强，造成对相邻扇区的干扰增加。
- 电调下倾：电调下倾的电平同步下降，因此距离覆盖范围虽然变小，但覆盖角域不变。
- 基站天线要求：0-10°连续电调下倾



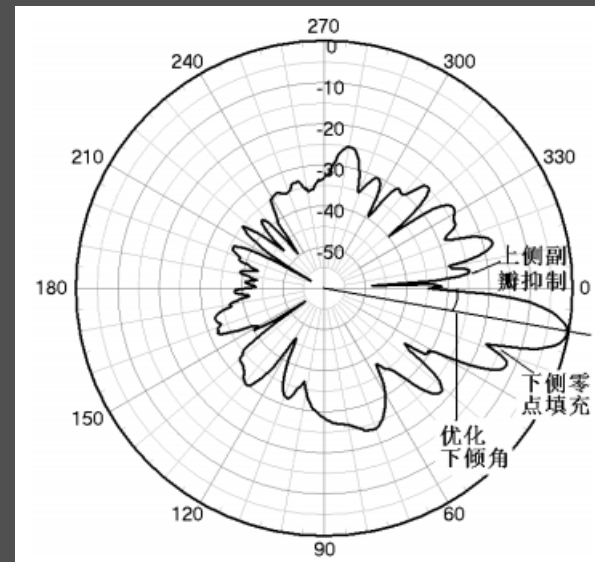
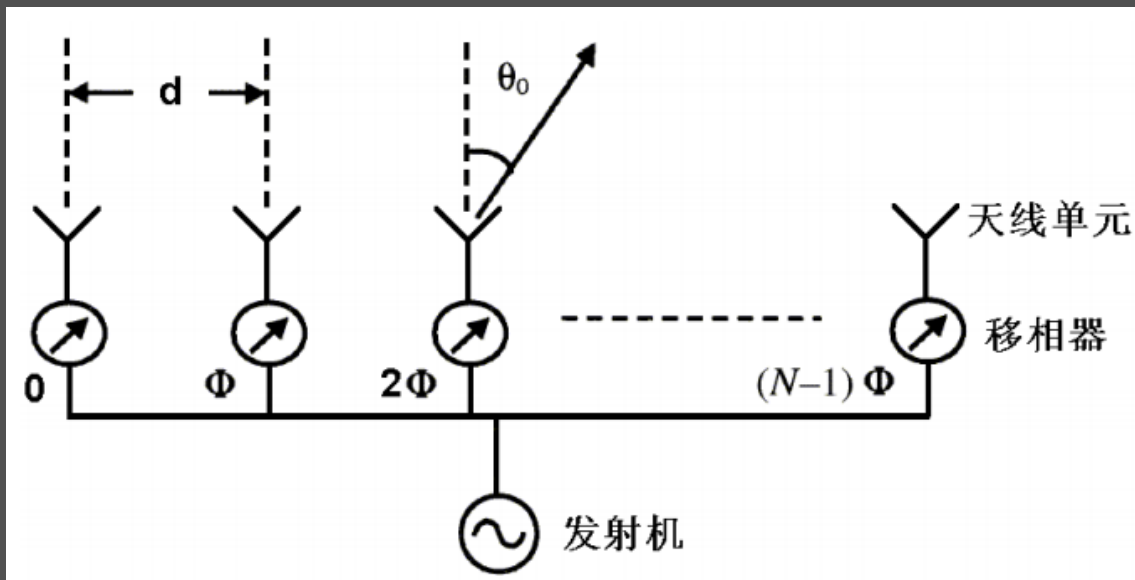
基站天线指标

电辐射性能指标-电调下倾

➤线性均匀天线阵列，当相邻单元的相位依次相差 Φ 时，最大波束形成于 θ_0 空间方向：

$$\Phi = -\frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sin \theta_0$$

➤设计一个可连续改变相位的移相器装置，可以得到不同的相位 Φ ，从而实现指向 θ_0 方向的连续变化，实现电调下倾。



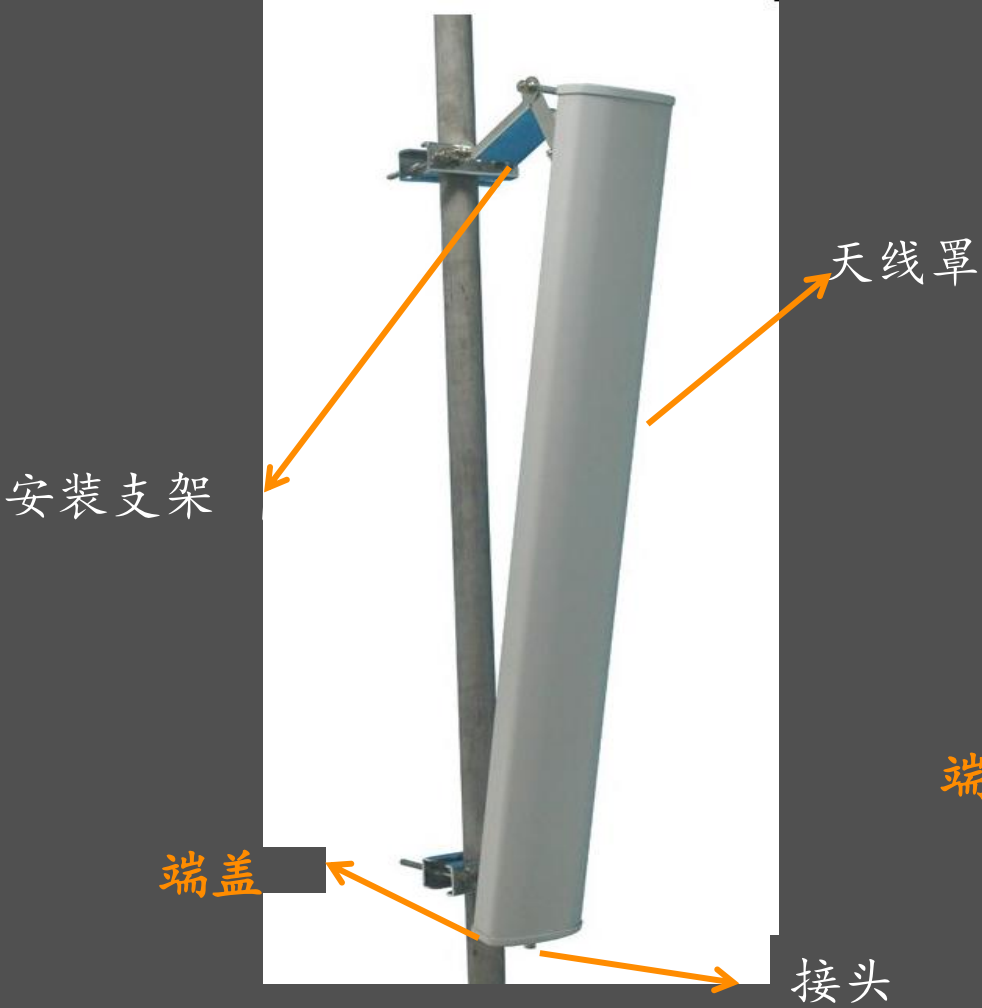


4

基站天线的设计

基站天线的组成

基站天线的外部组成部分

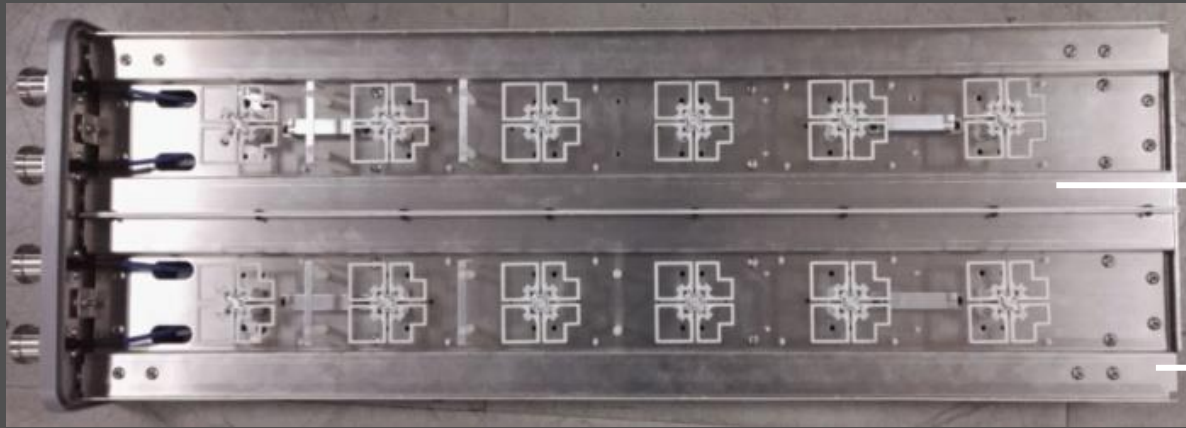


基站天线的外部组成部分



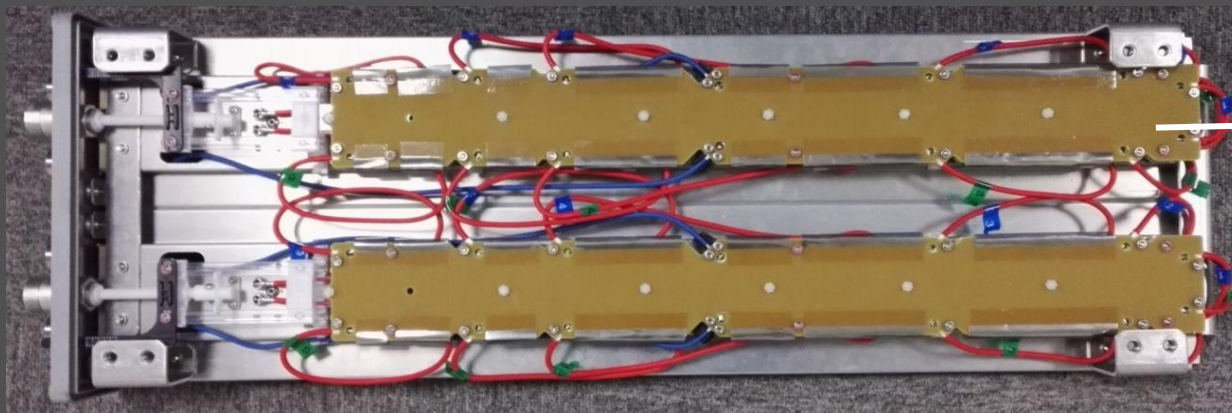
基站天线的组成

基站天线的内部组成部分



辐射单元 (振子)

反射板



移相器

电缆

基站天线的设计步骤

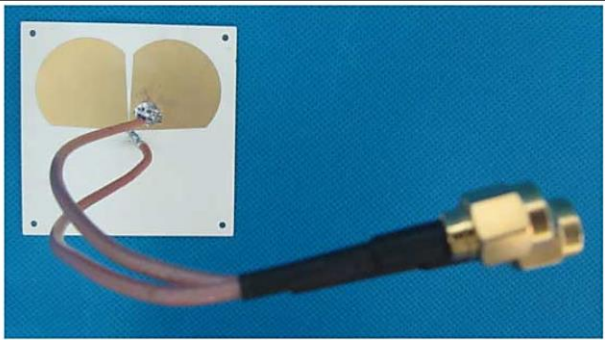
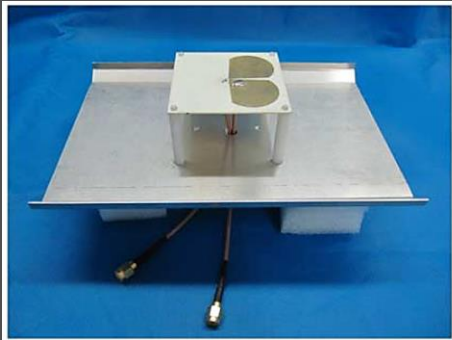
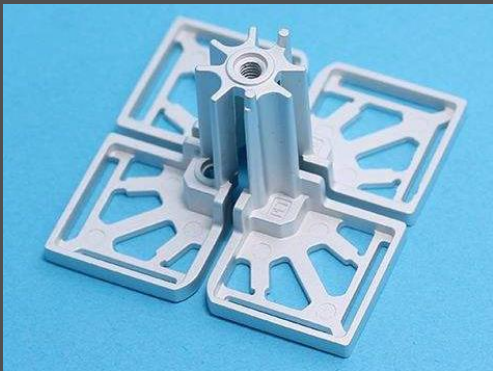
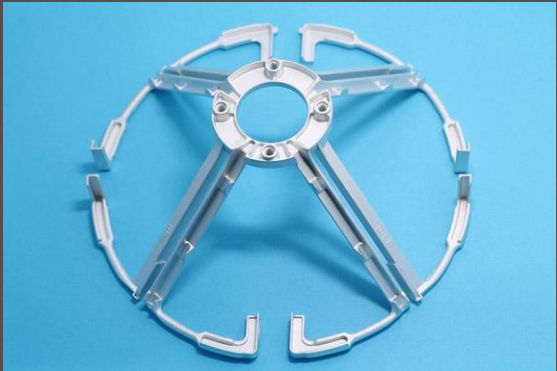
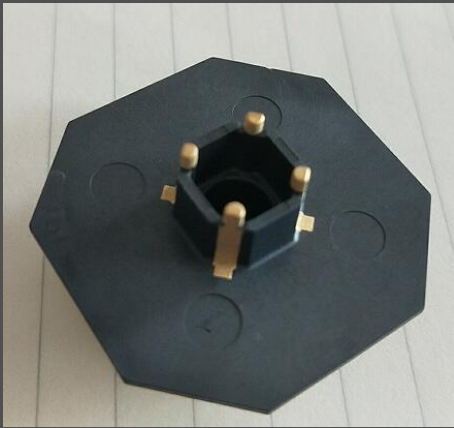
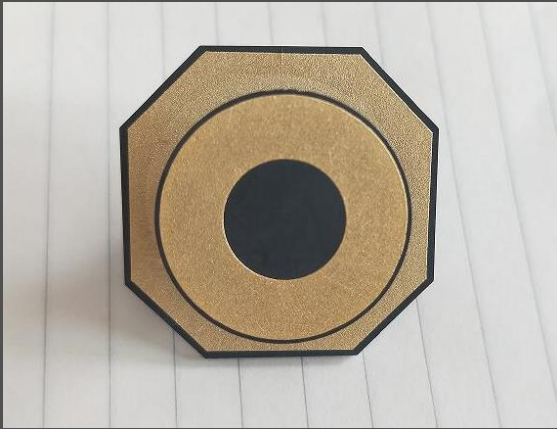
- 根据天线需要满足的增益、3dB波束宽度和旁瓣抑制等指标，确定天线的阵列布局、激励和辐射单元个数；
- 设计满足电气性能和辐射性能指标的天线辐射单元；
- 根据天线阵列布局和激励，仿真天线阵列，使其满足辐射性能指标；
- 根据天线阵列激励，设计相应的天线阵列馈电网络；
- 打样
- 调试，使天线阵列同时满足电气性能和辐射性能指标；
- 做功率容量、震动试验、环境试验；
- 终样测试；
- 试产；
- 等待量产。

辐射单元的设计

- 基站天线的工作频段为窄带频段时（带宽小于21%），一般采用贴片天线；
- 基站天线的工作频段为宽带频段时（带宽大于21%），一般采用半波振子天线；
- 辐射单元设计步骤：
 1. 设计辐射体，使其的辐射方向图满足指标，端口阻抗比较收敛，易于匹配；
 2. 选择合适的匹配网络，使输入端口在工作频段内具有良好的阻抗匹配，对应的VSWR小于1.5，同时满足端口隔离度要求，一般要求大于28dB；
 3. 仿真完整天线模型，如果其满足辐射性能和电气性能指标，则完成设计；
 4. 如果辐射性能不达标，则微调辐射体的尺寸使其满足辐射指标，再进行匹配。

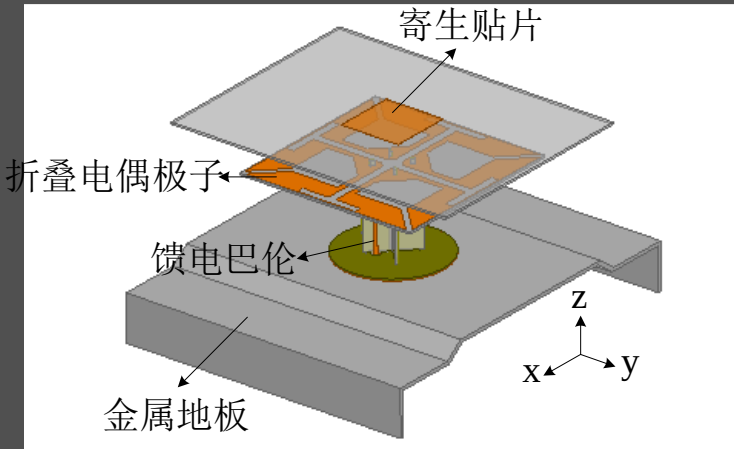
基站天线各类振子与工艺

类型	工艺	优劣势分析
金属振子	钣金成型、铸造成型	优势：电气性能好、辐射效率高、方案成熟；劣势：重量大、成本高
微带振子	LDS+PCB贴片	优势：结构简单、成本低、重量适中；劣势：损耗大，性能有待进一步提升
塑料振子	选择性电镀或者LDS化镀	优势：重量轻、成本低；劣势：待验证

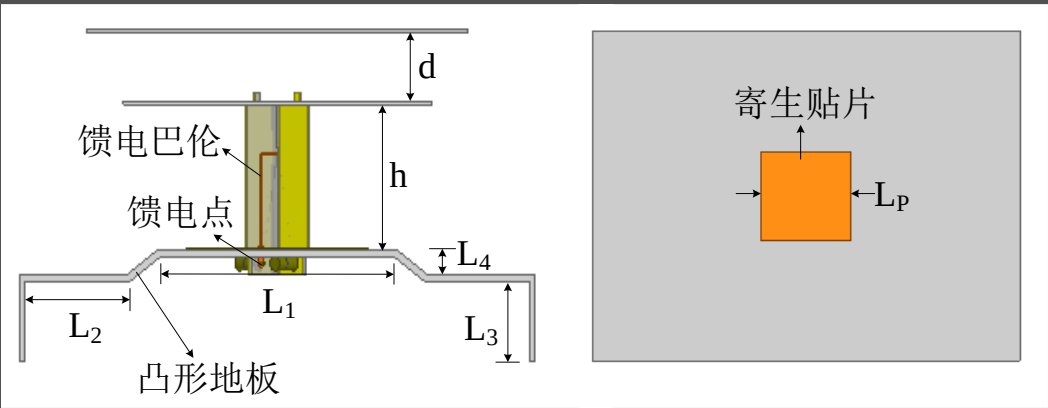


辐射单元的设计

天线单元结构

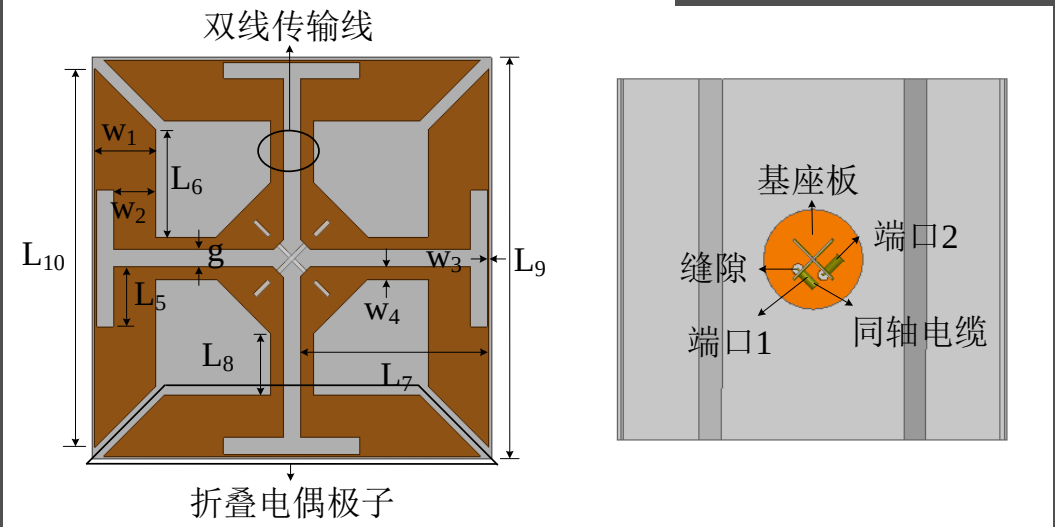


整体结构



侧视图

寄生贴片

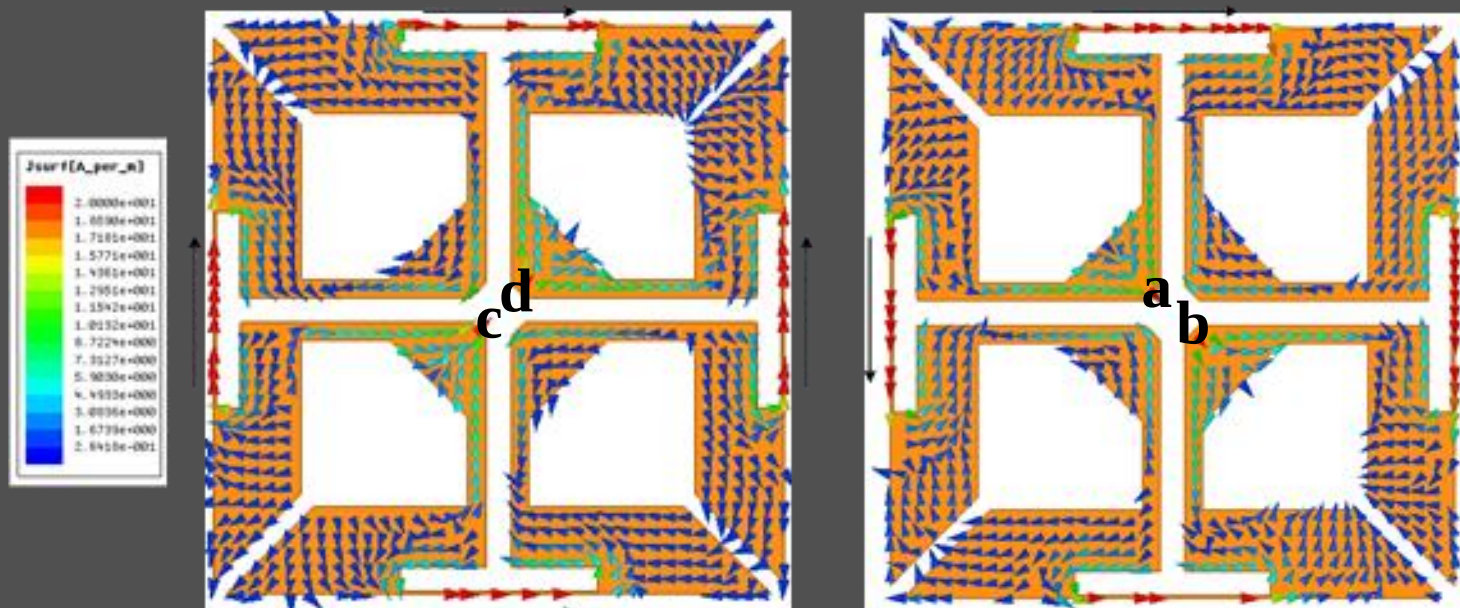


折叠电偶极子

俯视图

辐射单元的设计

电流分布

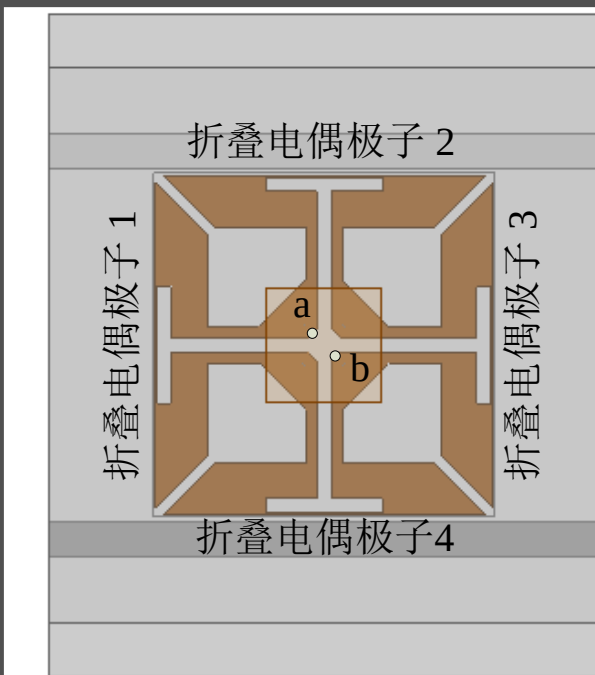


+45°极化电流分布

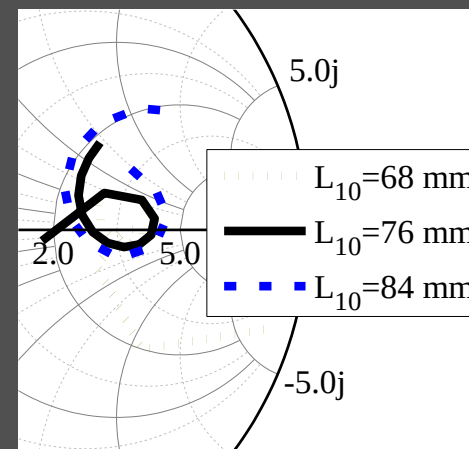
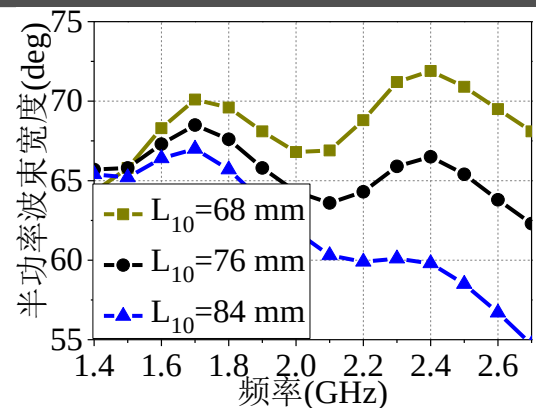
-45°极化电流分布

辐射单元的设计

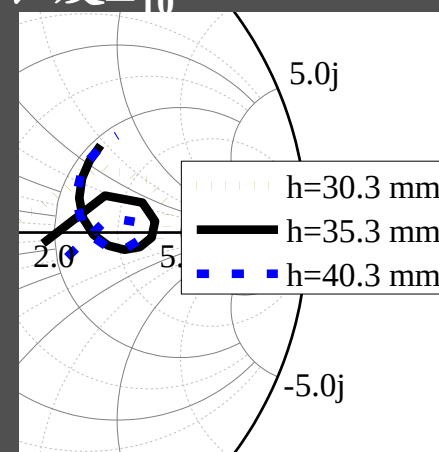
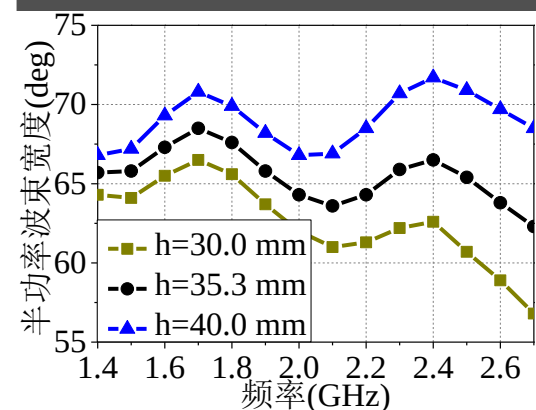
折叠电偶极子设计



折叠电偶极子结构

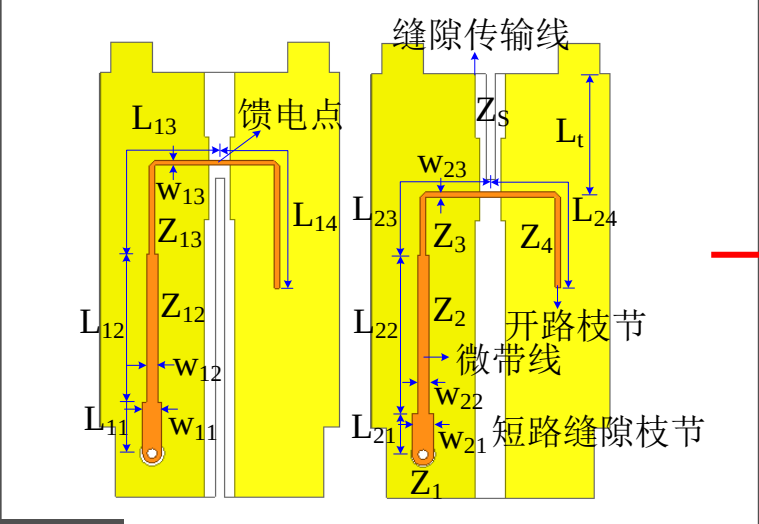


折叠电偶极子的长度 L_{10}



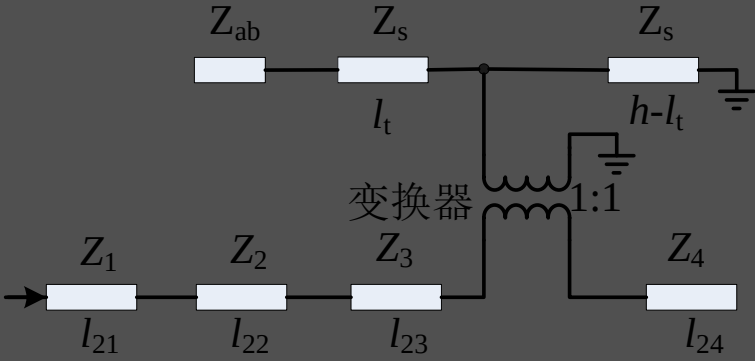
折叠电偶极子距离地板的高度 h

馈电巴伦的设计

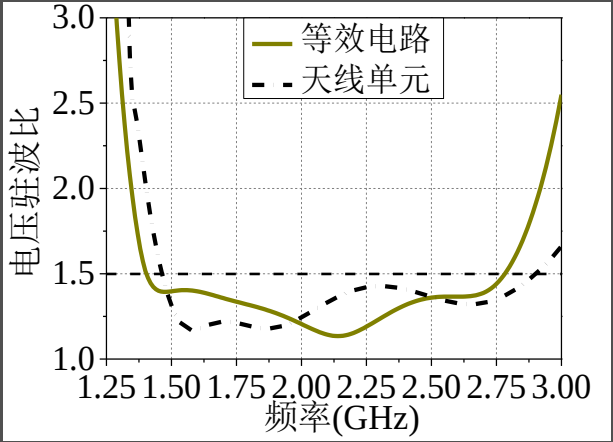


馈电巴伦结构

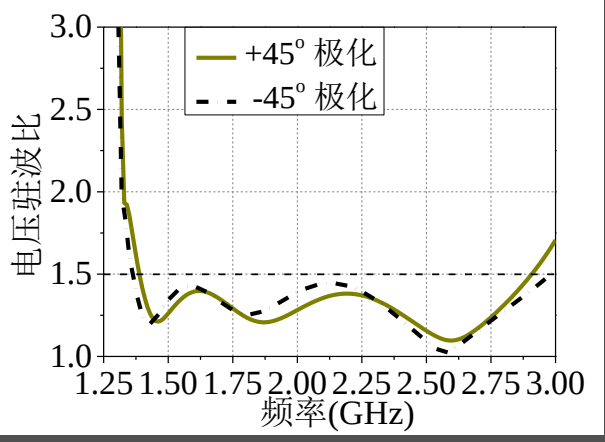
等效电路



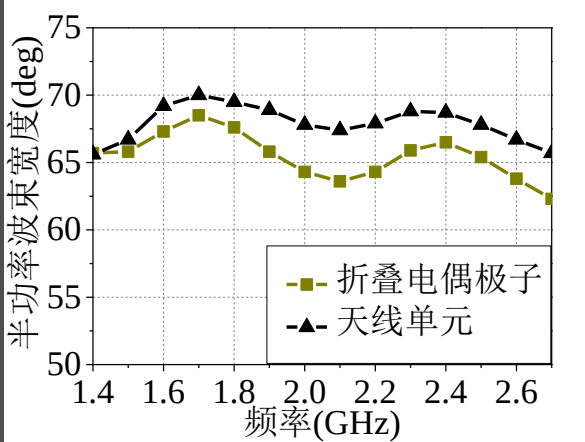
$Z_s=116.8\ \Omega$, $l_t=18.0\ \text{mm}$, $Z_1=50.0\ \Omega$, $l_{21}=2\ \text{mm}$, $Z_2=65.8\ \Omega$, $l_{22}=17\ \text{mm}$, $Z_3=95.9\ \Omega$, $l_{23}=6\ \text{mm}$, $Z_4=95.9\ \Omega$, $l_{24}=16.4\ \text{mm}$



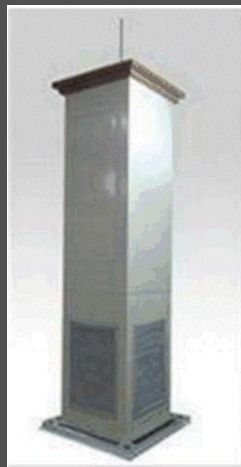
阻抗匹配对比



优化后天线单元仿真结果



基站天线的美化



方柱型美化



圆柱型美化



空调型美化



变色龙型美化



水塔型美化



集束型美化



六角围栏型美化



百叶方柱型美化

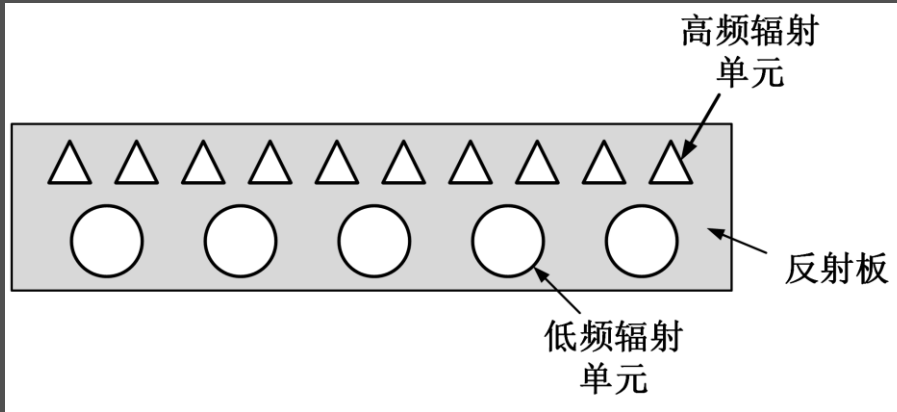


5

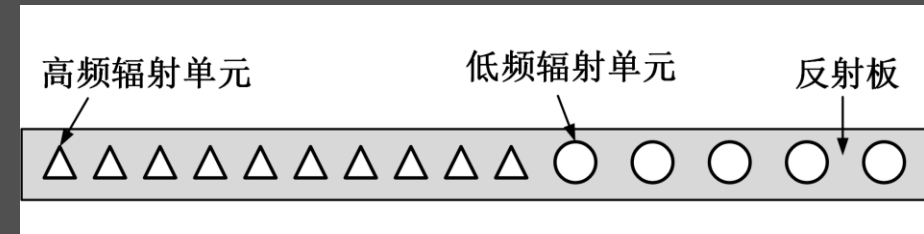
基站天线的阵列设计

天线共口径

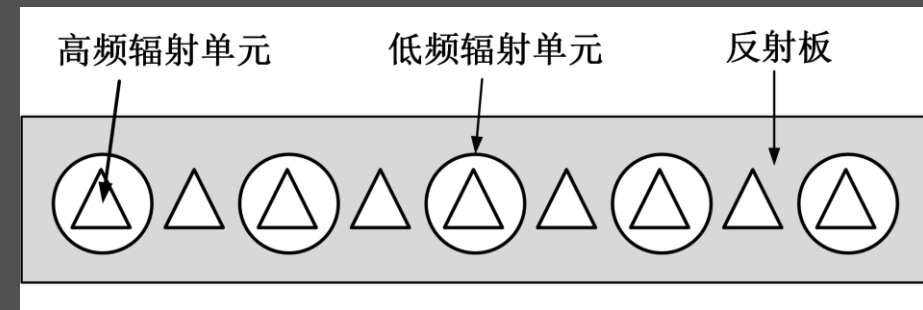
并排式



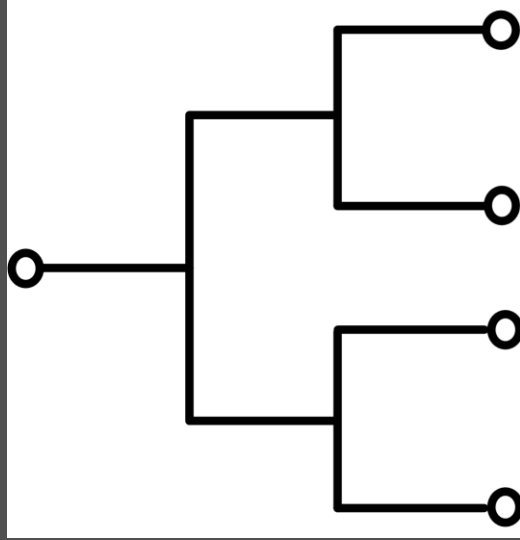
共轴式



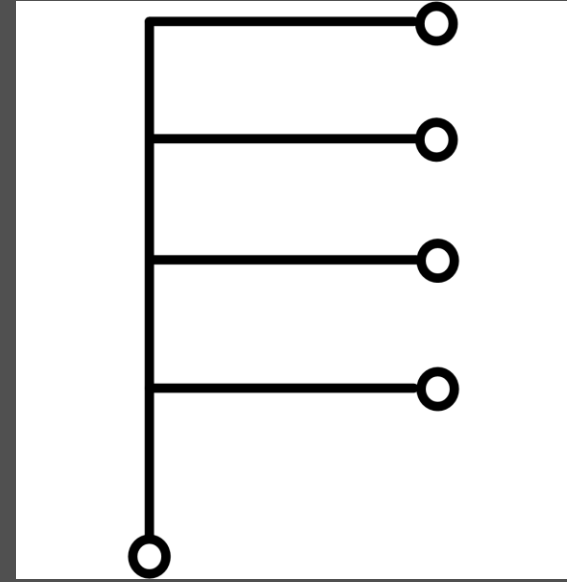
嵌套式



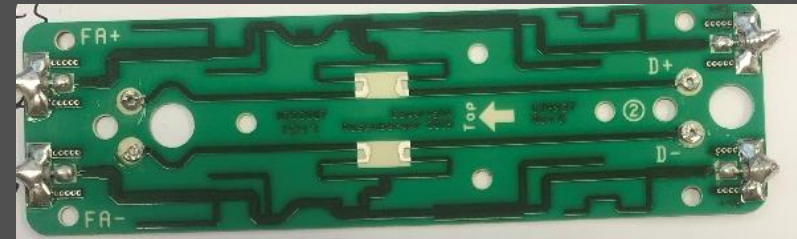
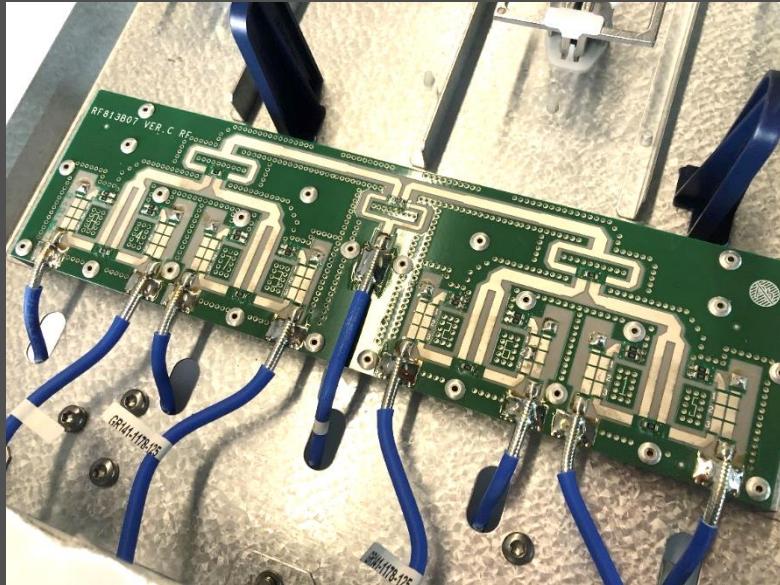
馈电结构示意图



并馈



串馈

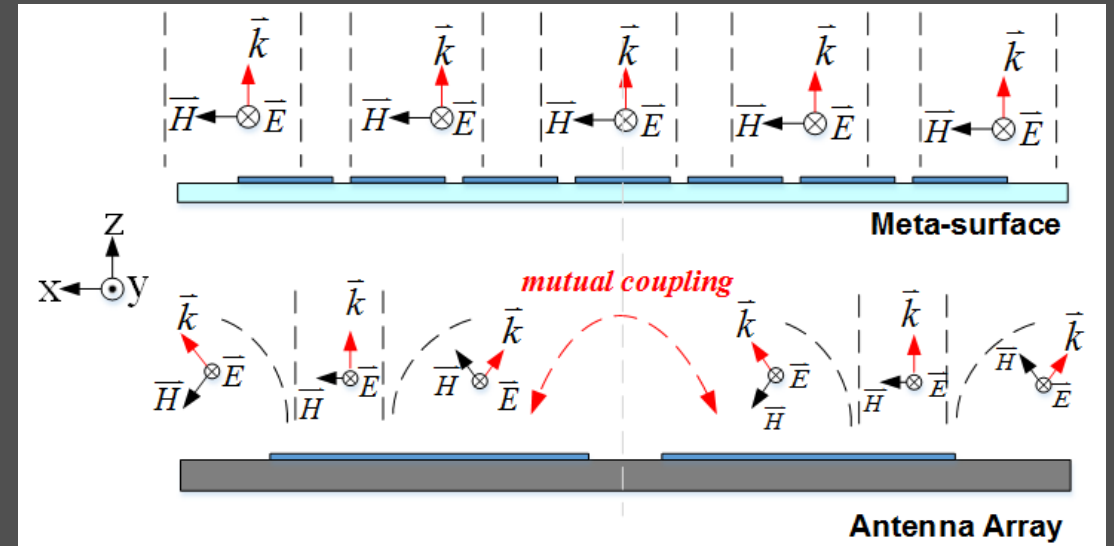
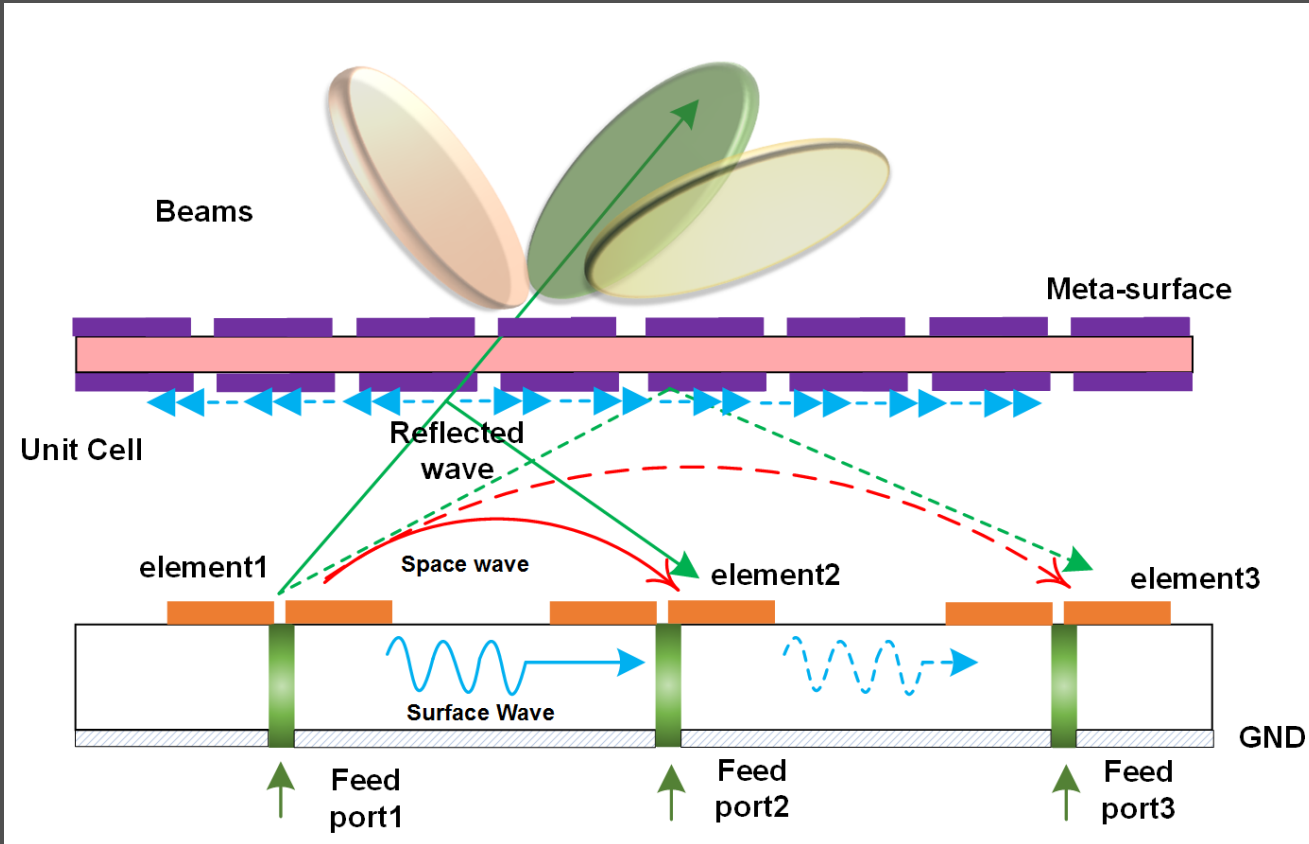




6

结合人工电磁材料的基站天线去耦合设计

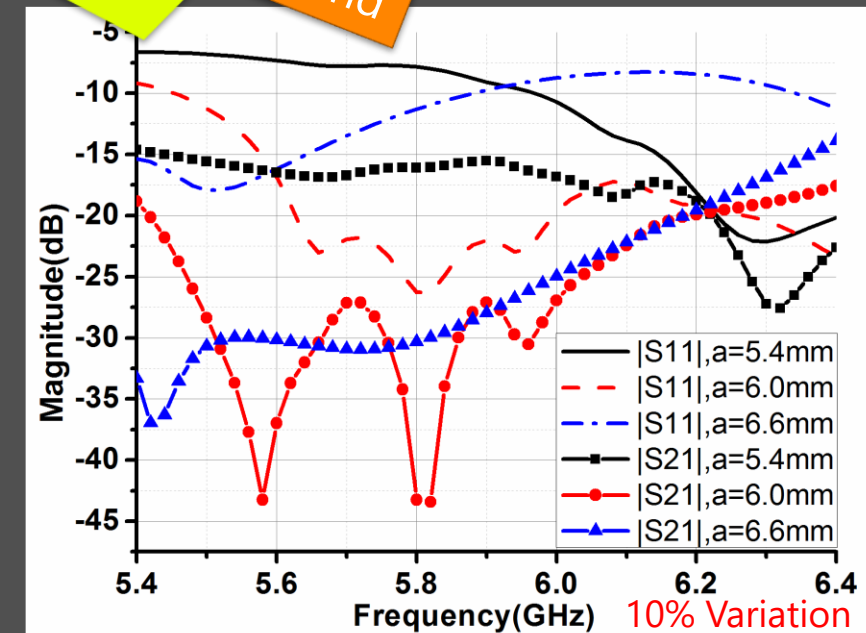
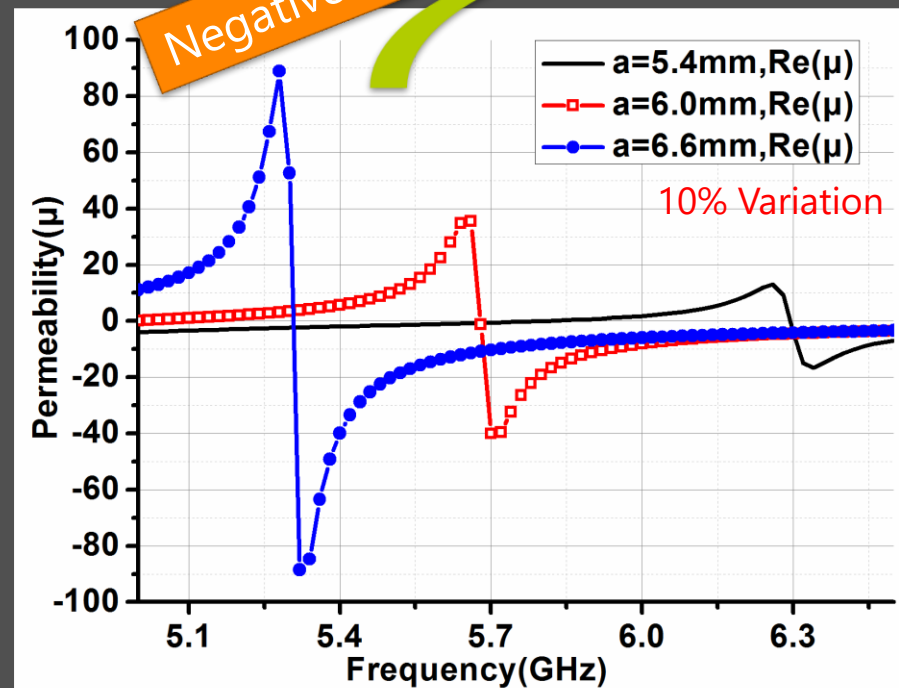
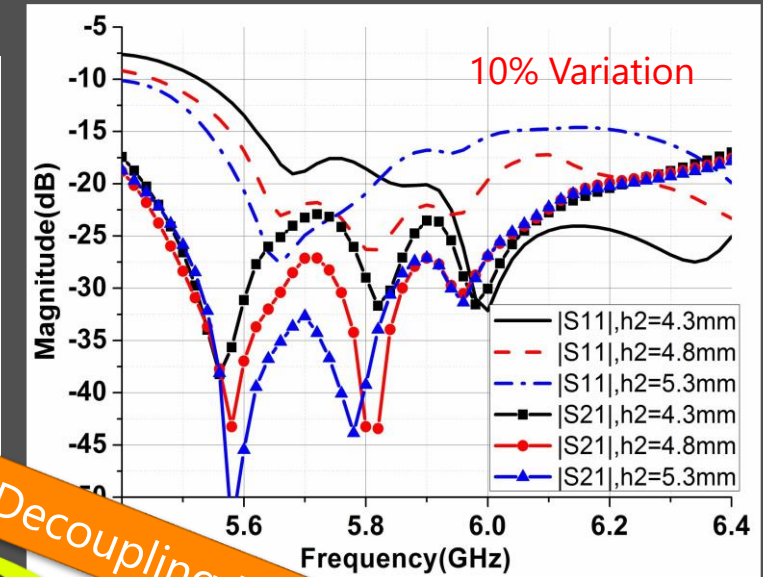
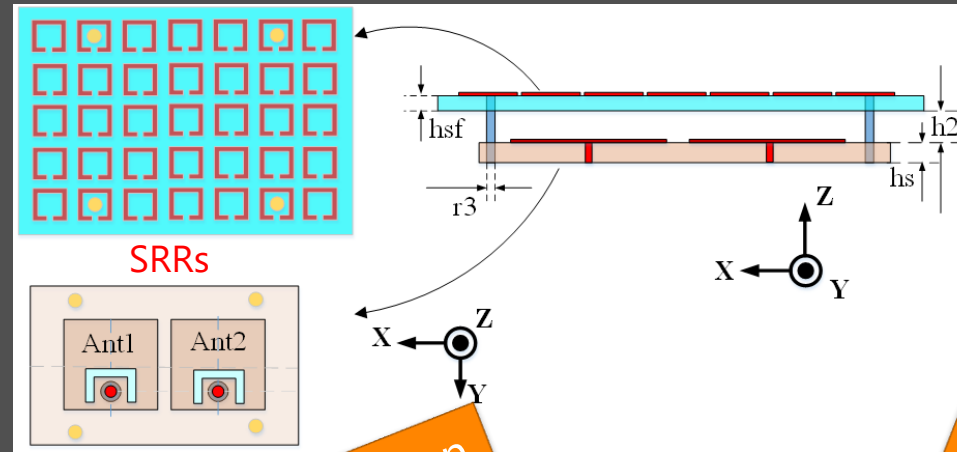
MAAD working mechanism



- Rearrange Wave Radiation
- ENG or MNG for evanescent wave along the meta surface
- Both space coupling and surface coupling reduced

Parametric Analysis for single layer SRR version

- The antennas can be extremely closely-spaced
- A small amount of profile increase
- Stable Decoupling Region
- Extendable to Massive MIMO



MAAD Field Visualization

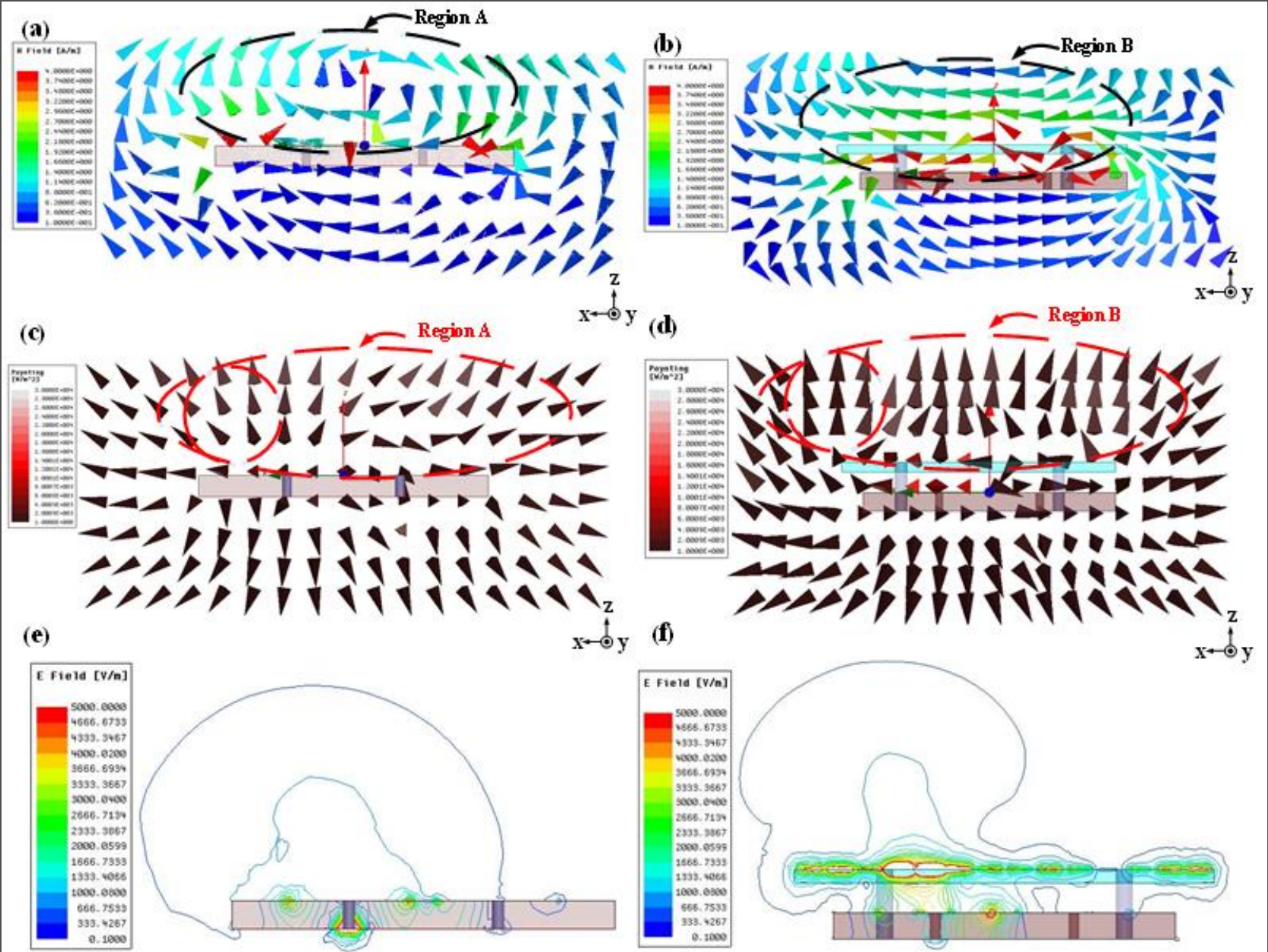
Without Meta

With Meta

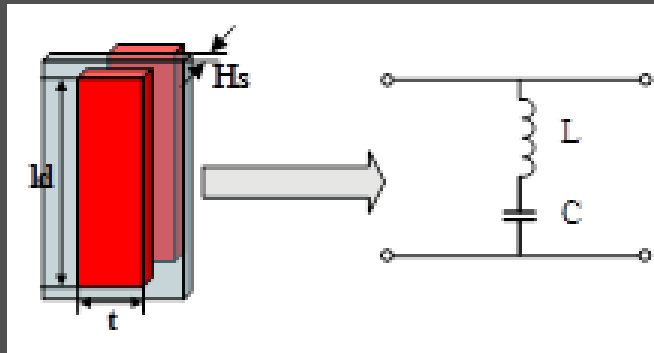
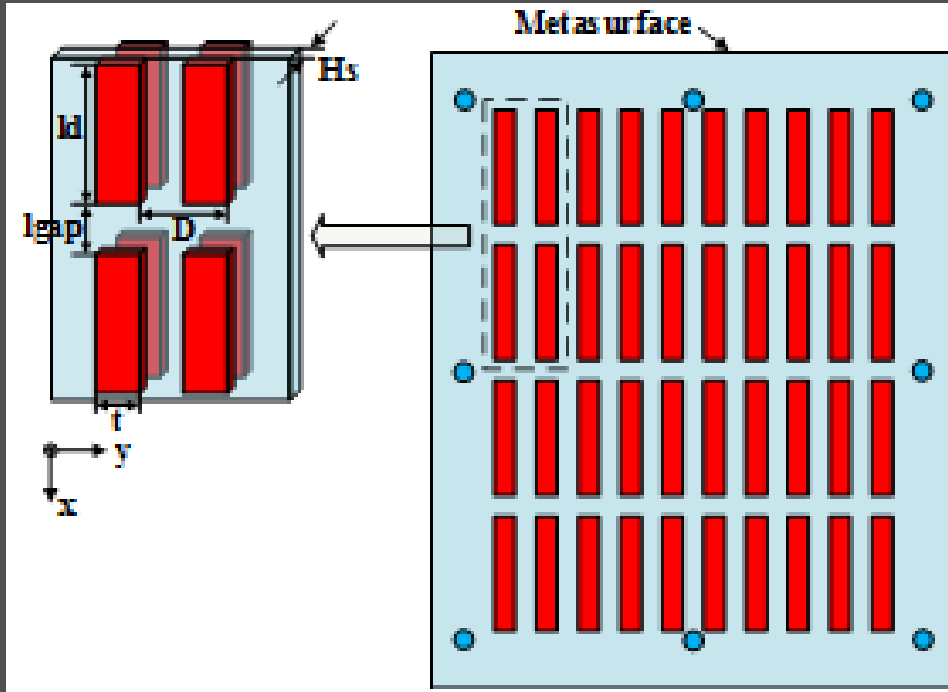
Vector H-Field

Poynting Vector

E-field
Magnitude



A Very Compact MAAD Design



The inductance of parallel lines:

$$L = \frac{\mu_0(l_d \cdot h_s)}{w}$$

The capacitance between two layers of lines:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0(l_d \cdot w)}{4h_s}$$

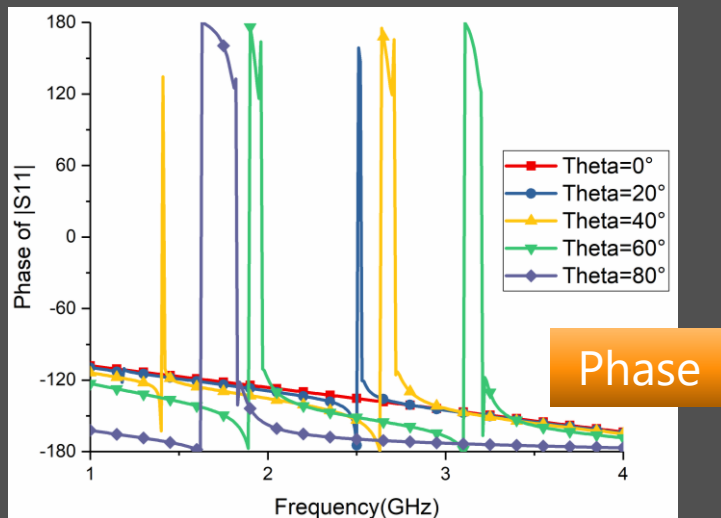
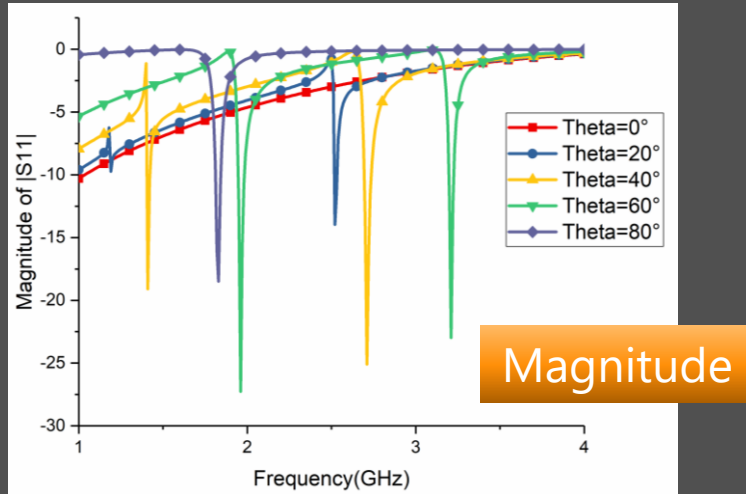
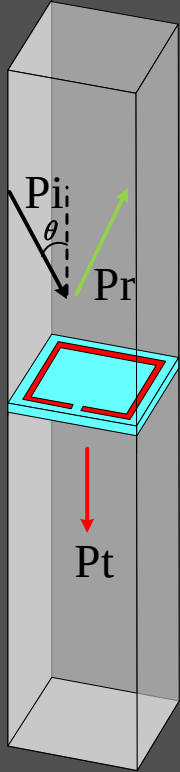
The resonant frequency:

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{l\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c_0}{\pi l d \sqrt{\epsilon_r}}$$

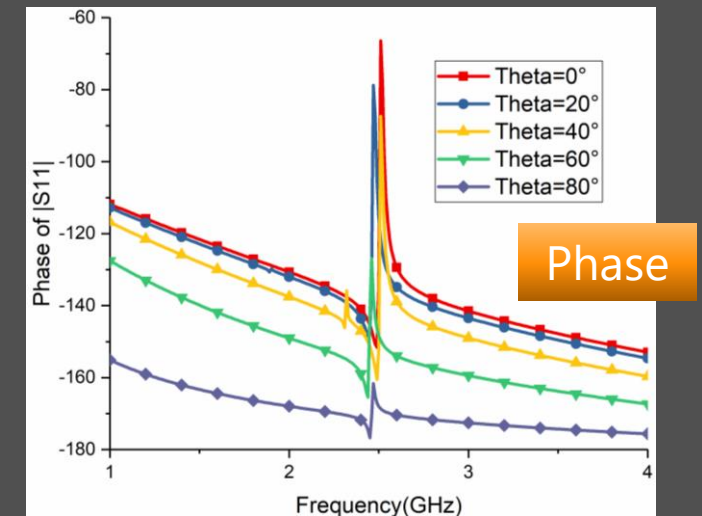
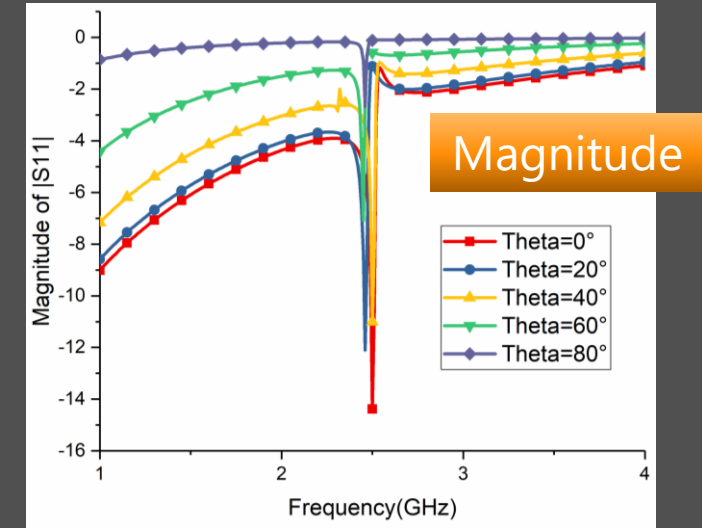
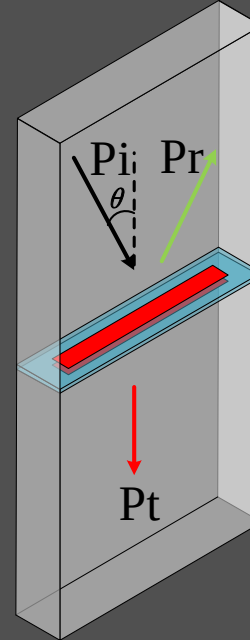
- The resonance frequency inversely proportional to the wire length
- The resonance frequency does not depend on the width of the wire

Unit Cell Analysis and Comparison

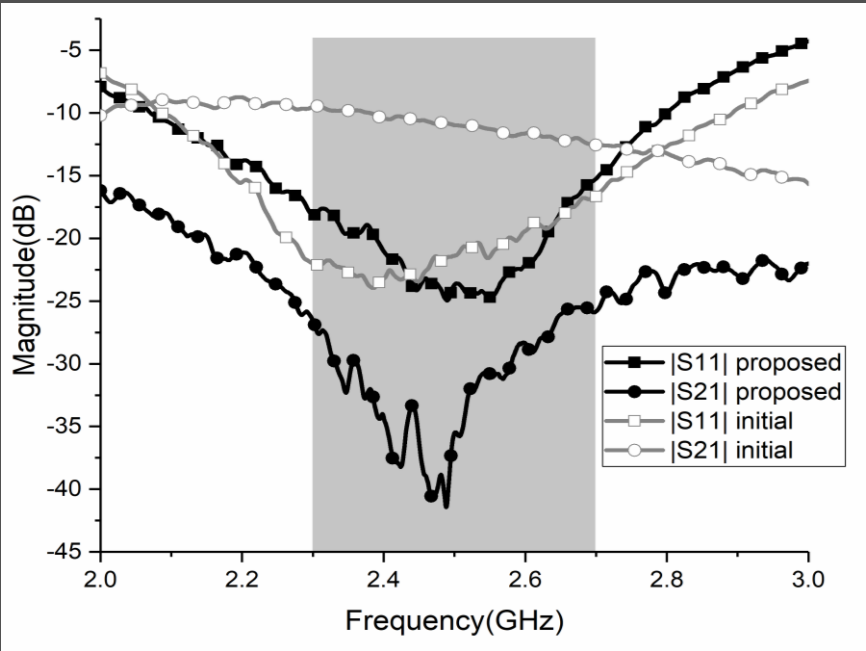
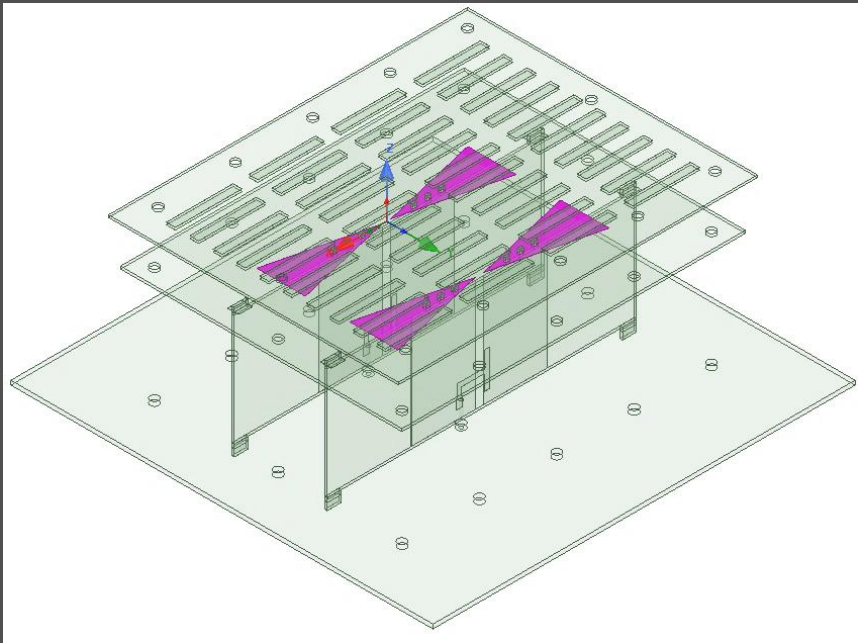
■ Split Ring Resonator



■ Double Layer Short Wires



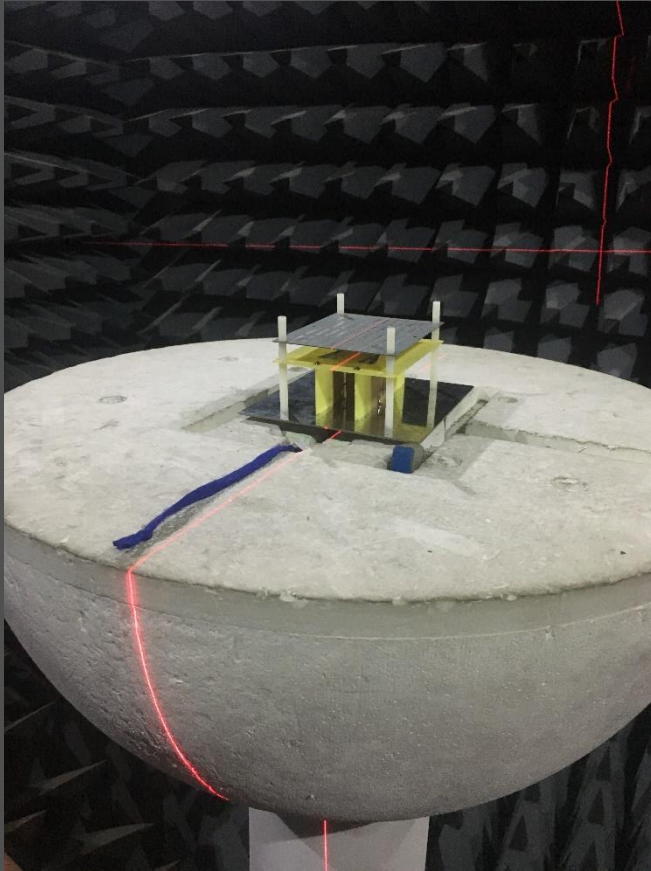
MAAD for two linear polarized antennas (H-Coupling)



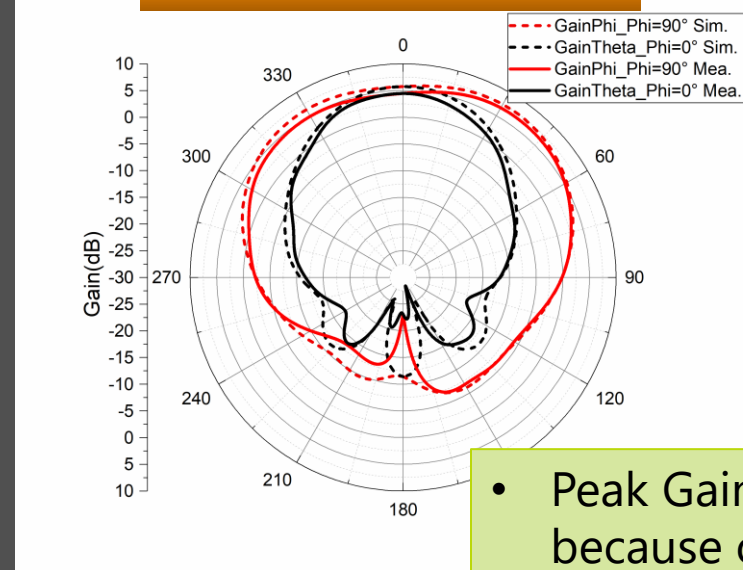
Frequency	1710-2170MHz	2300-2690MHz
Element Spacing	Smaller than 0.25 Wavelength	
Antenna Gain	$\geq 9.5\text{dBi}$	
3dB BW	$60^{\circ}\pm 5^{\circ}$	
VSWR	≤ 1.4	
Isolation	$\leq -25\text{dB}$	
XPD	$\geq 25\text{dB}$	

Radiation Characteristics

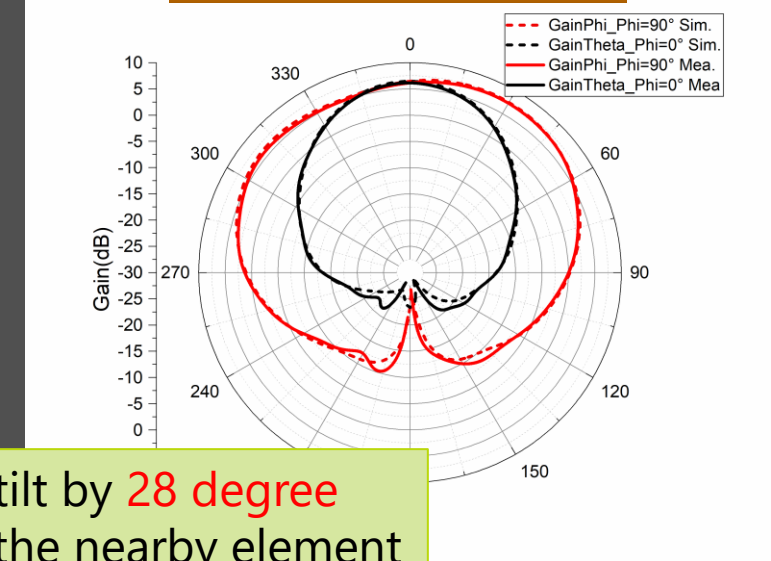
DUT in Multi-Probe Near Field Chamber



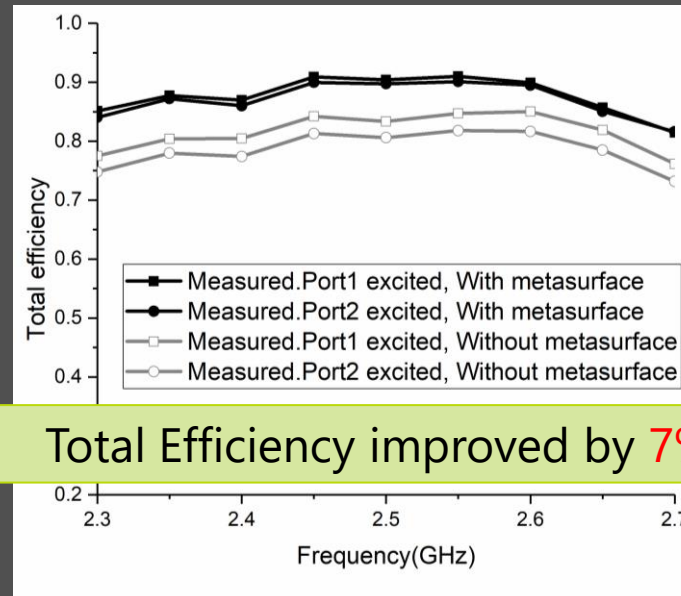
Pattern without META



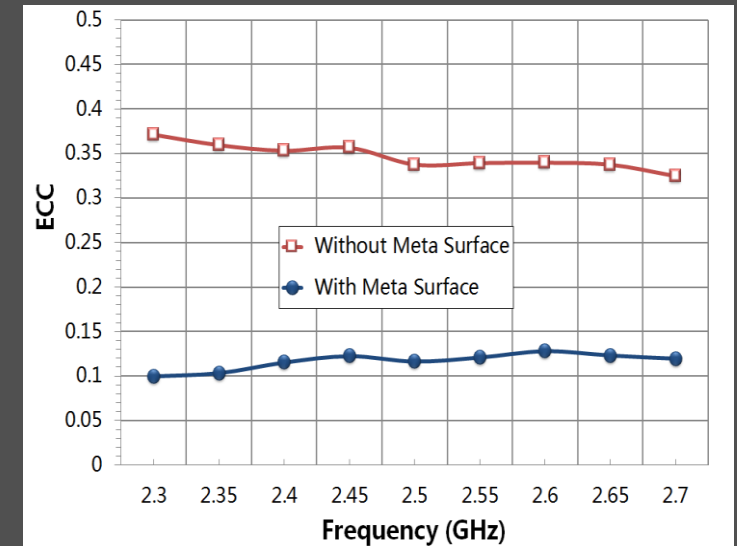
Pattern with META



- Peak Gains tilt by **28 degree** because of the nearby element



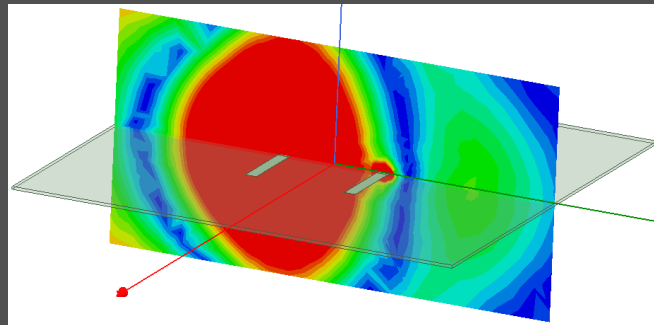
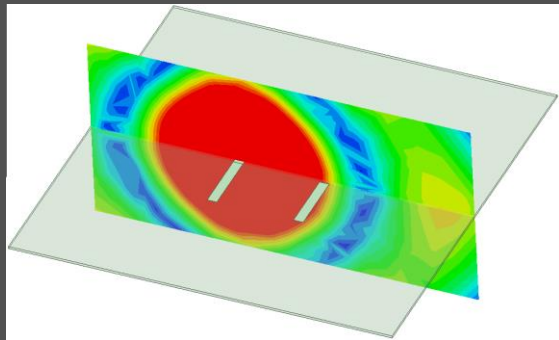
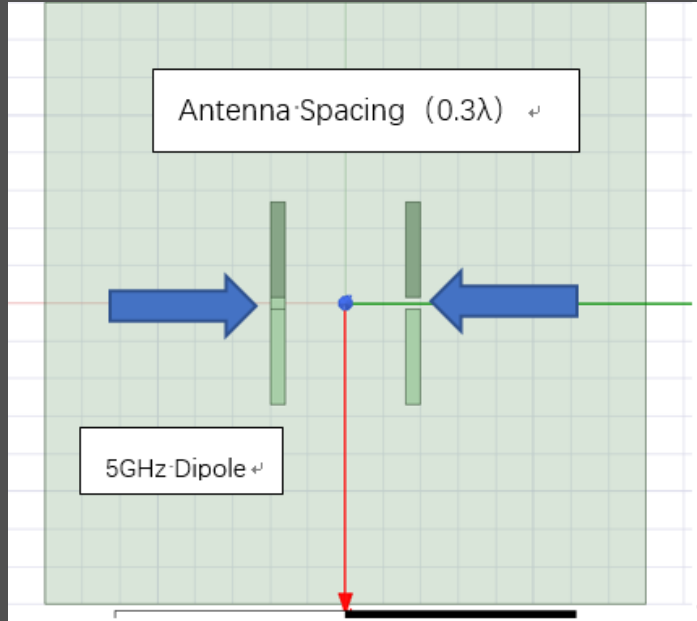
- Total Efficiency improved by **7%**



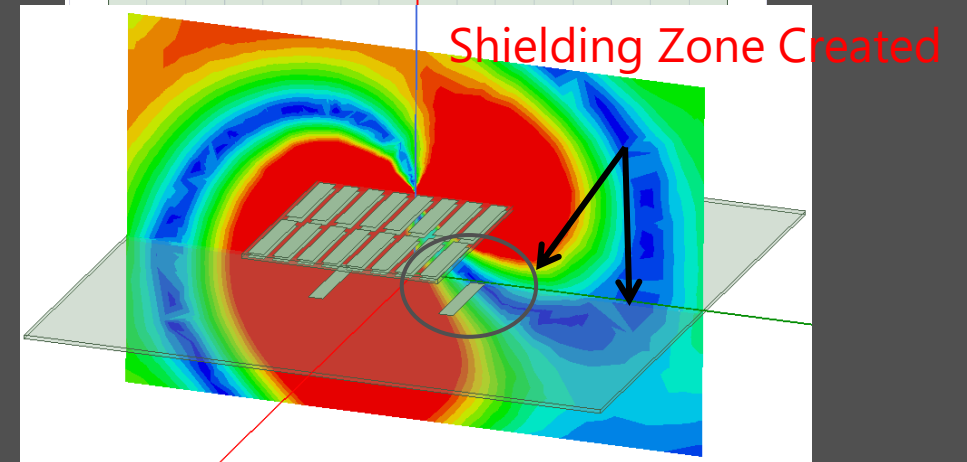
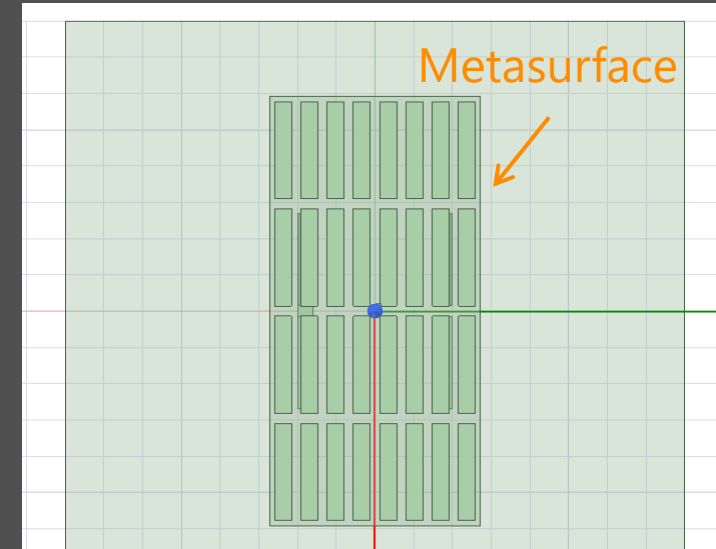
- ECC improve from **0.35 to 0.15**

Further Study of the Working Mechanism

- Strongly Coupled Antennas without Meta
(10 dB isolation)

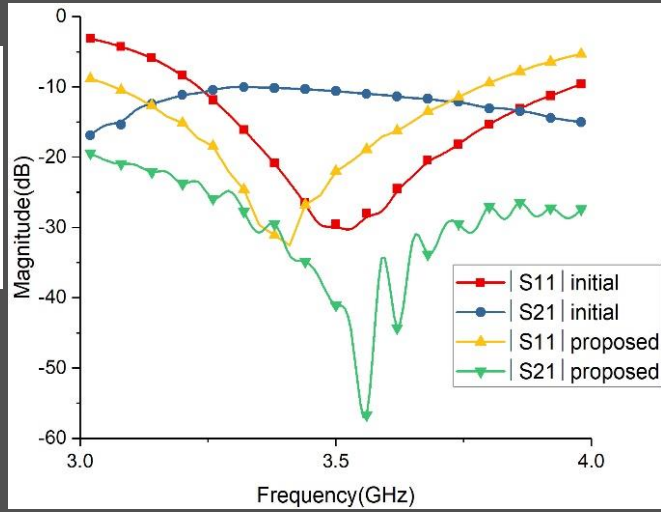
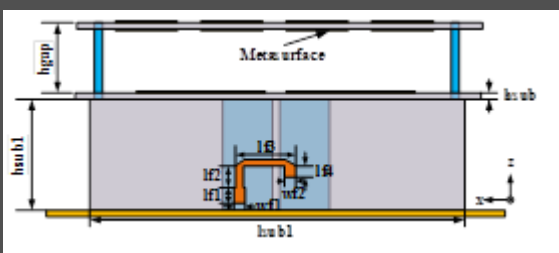
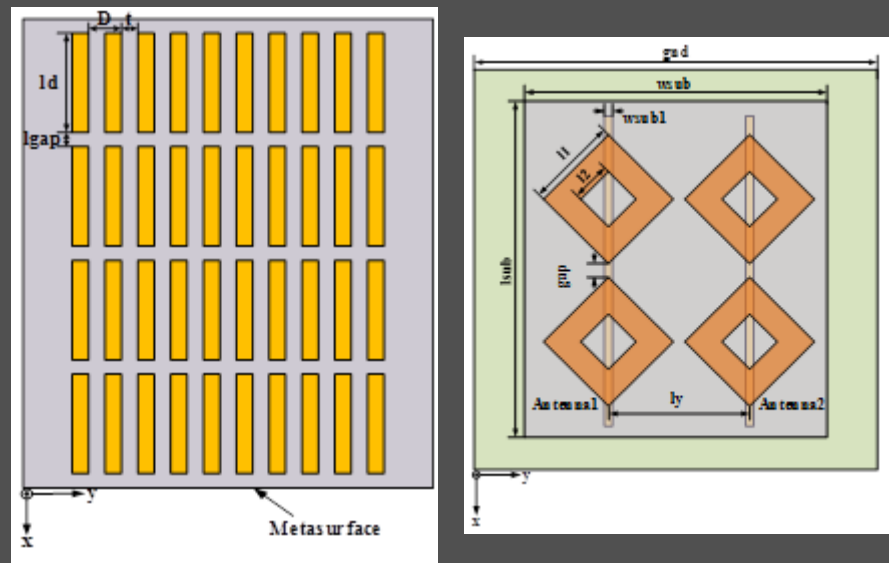


- Strongly Coupled Antennas without Meta

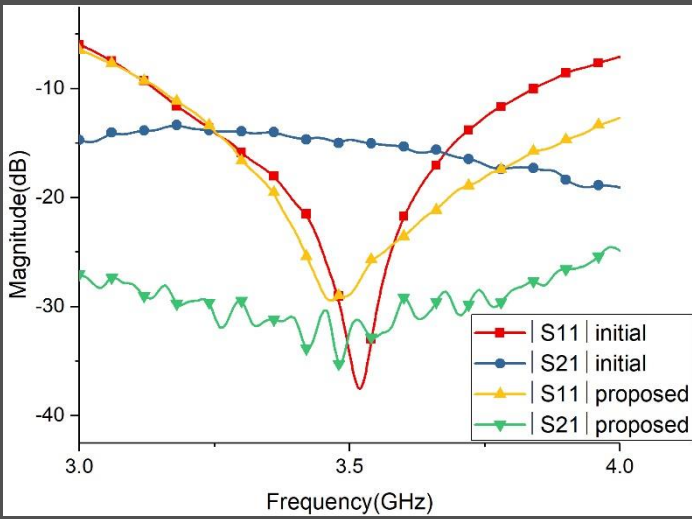
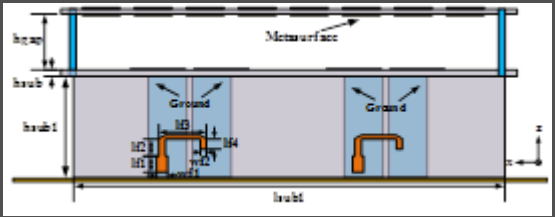
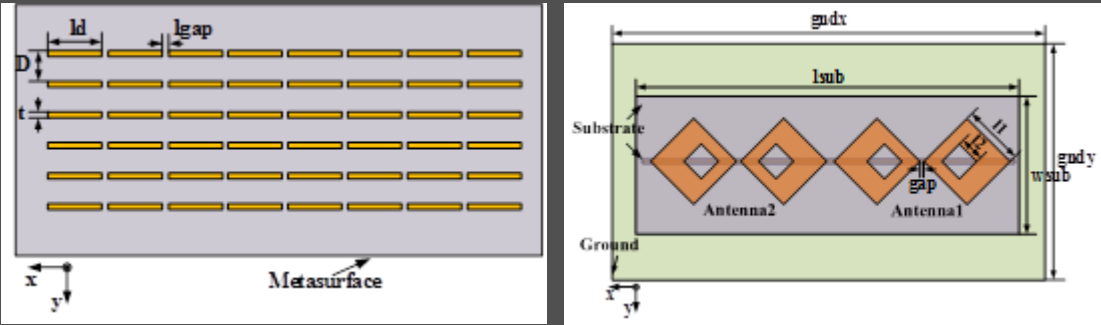


Decoupling in H and E plane

H-plane

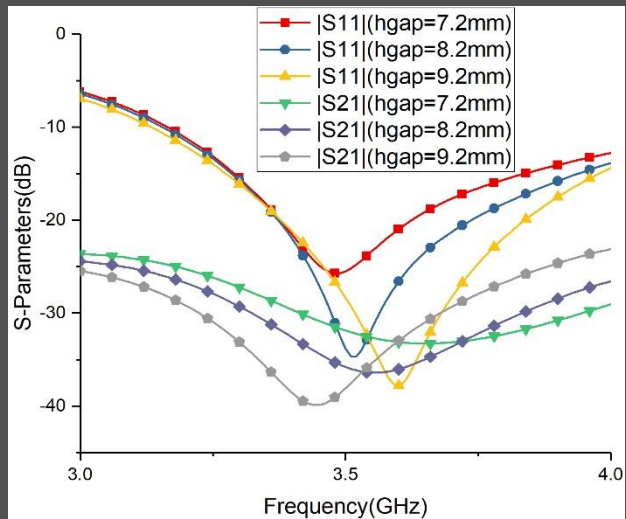


E plane

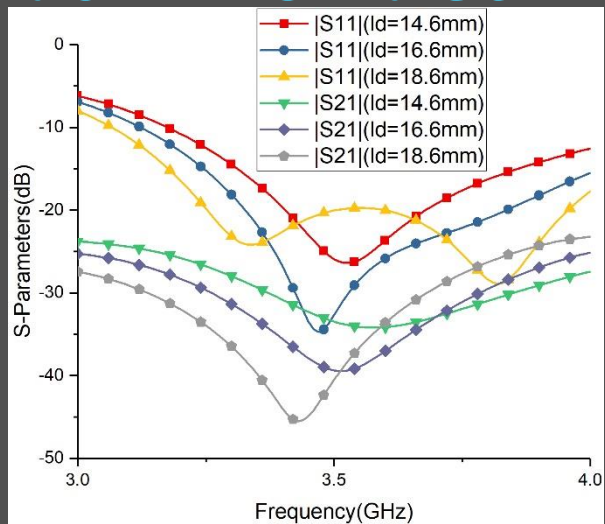


Parametric Studies

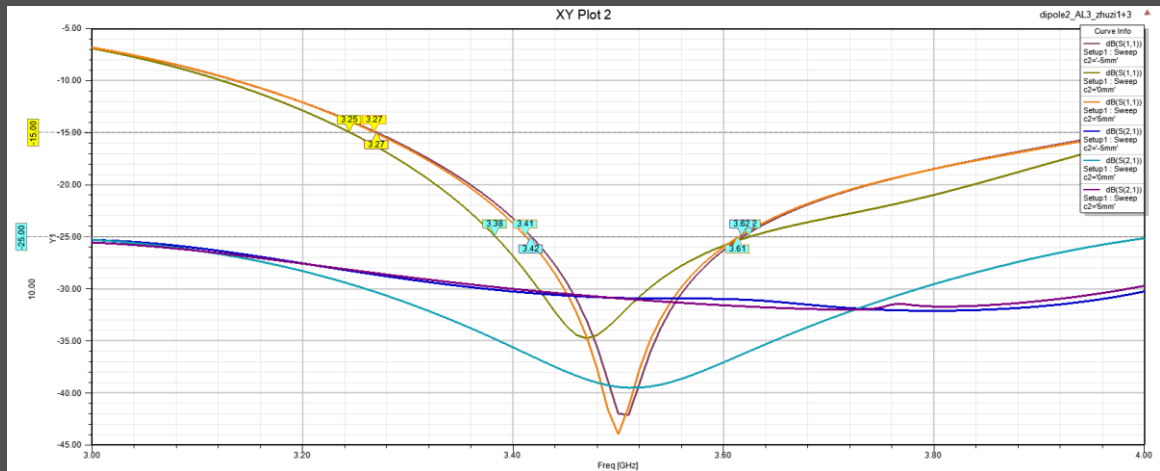
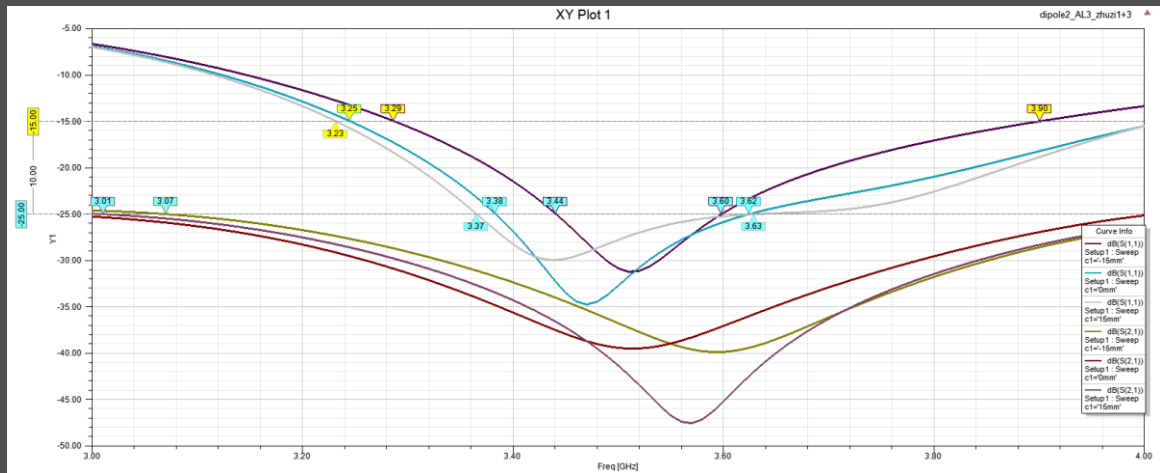
- Variation in Profile



- Variation in Unit Cell

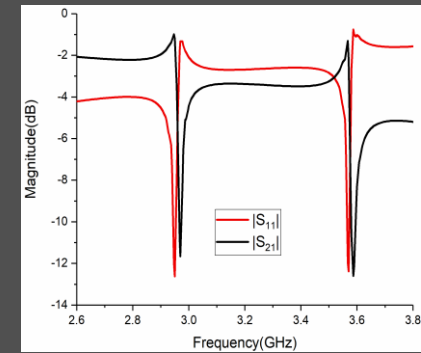
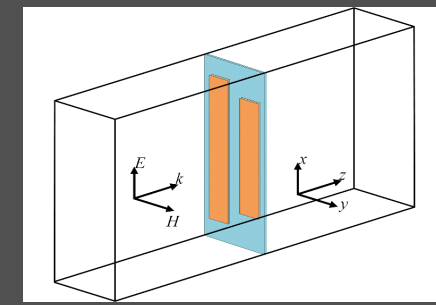
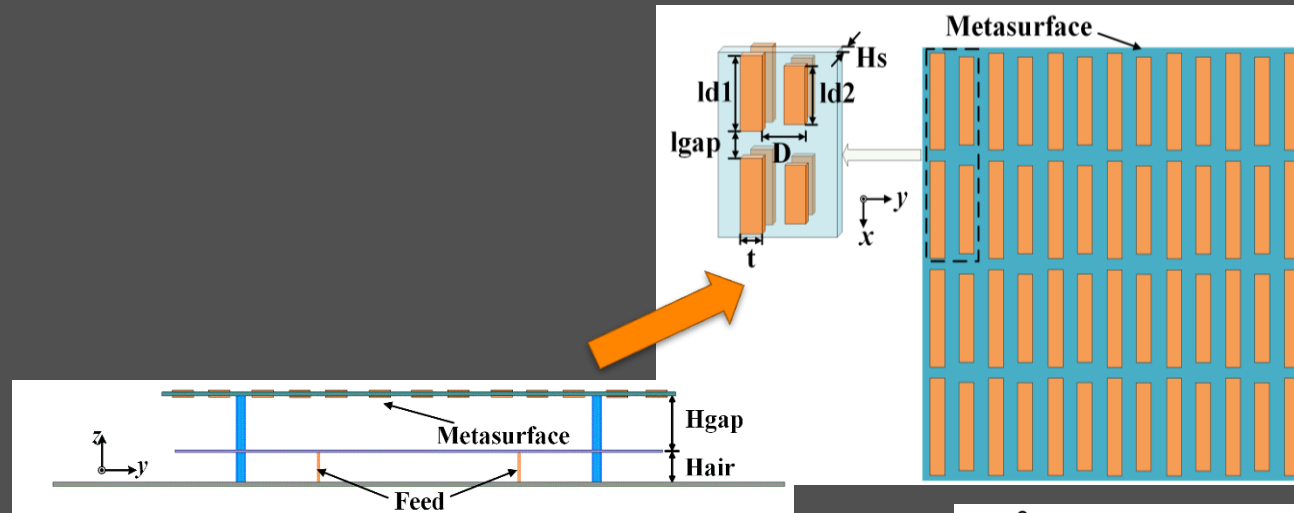


- Variation in XOY plane



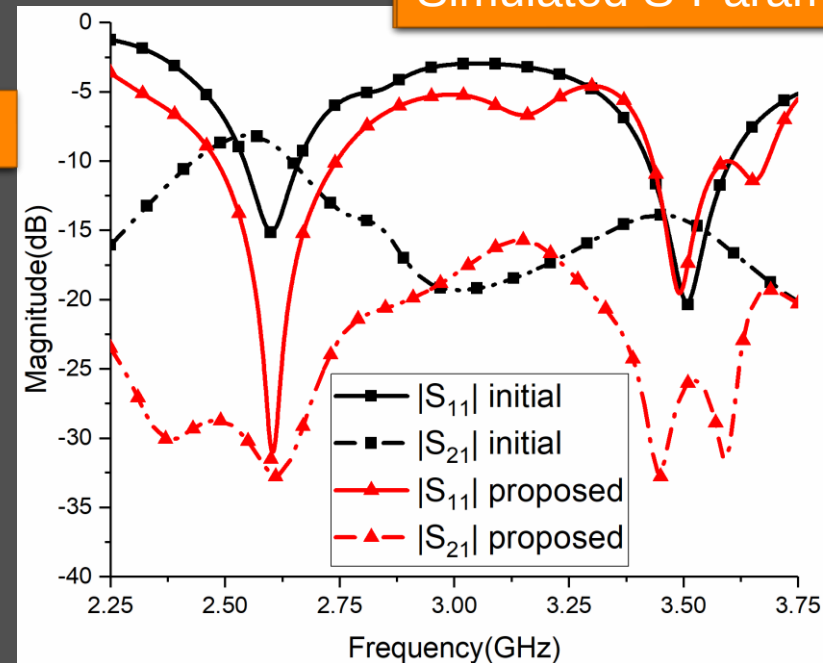
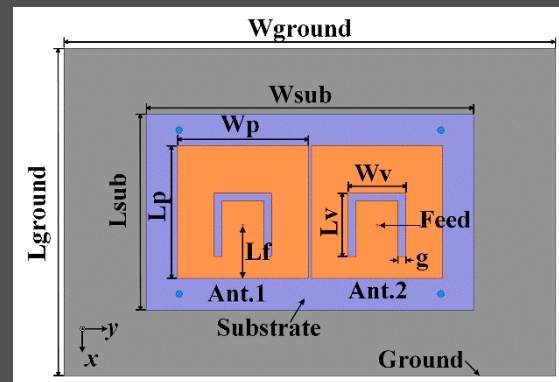
双频去耦合设计

Dual Band Superstrate

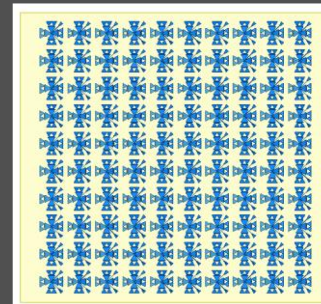
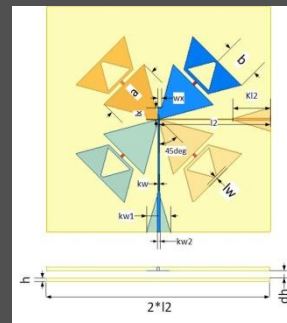
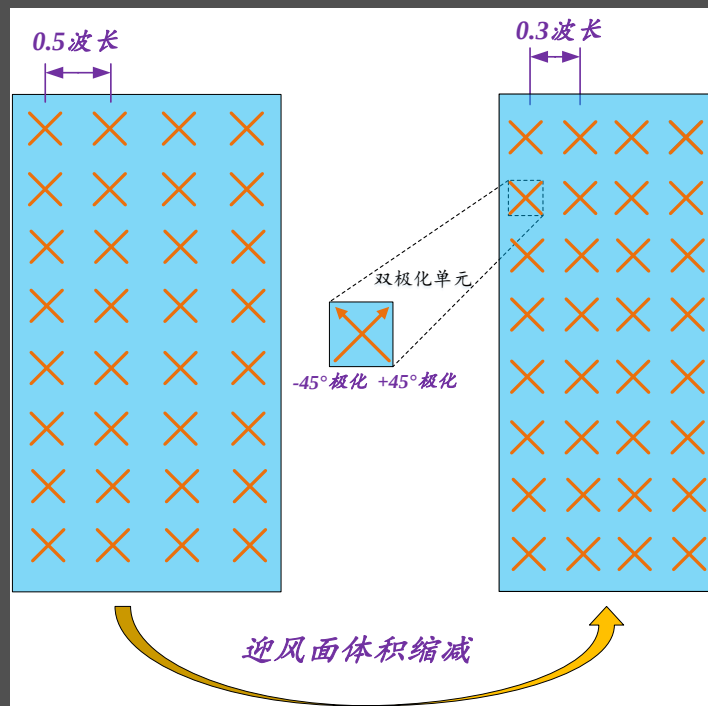


Simulated S-Parameters

Dual Band Antennas



双极化Massive MIMO设计



- 通过超材料实现高密度Massive MIMO阵列的口径缩减;
- 单元间距从半波长缩短为0.3波长;
- 采用分形等方式实现天线单元尺寸缩减
- 实现基站天线迎风面缩减, 减小风阻;
- 保持基站天线原始性能不损失。

超材料覆层

小型化双极化
阵子 (带围框)

采用超表面实现超近间距天线阵列



Thanks for Listening!

lyzhao@xidian.edu.cn

Tel: 13891858286