

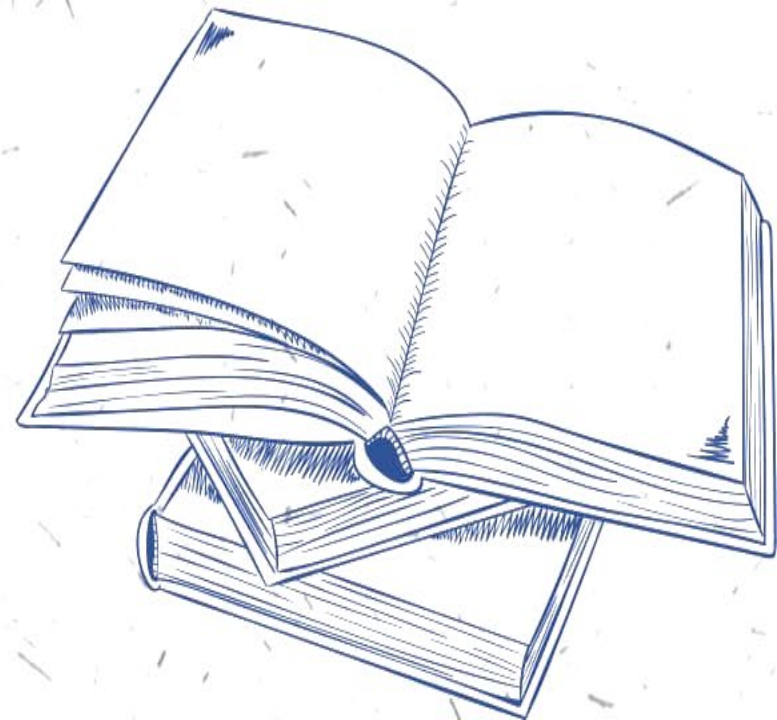


# 基于微带线的2-bit 波束可重构天线

近代天线理论与技术课程报告

指导教师：田加胜

邹雨泽





# 目录

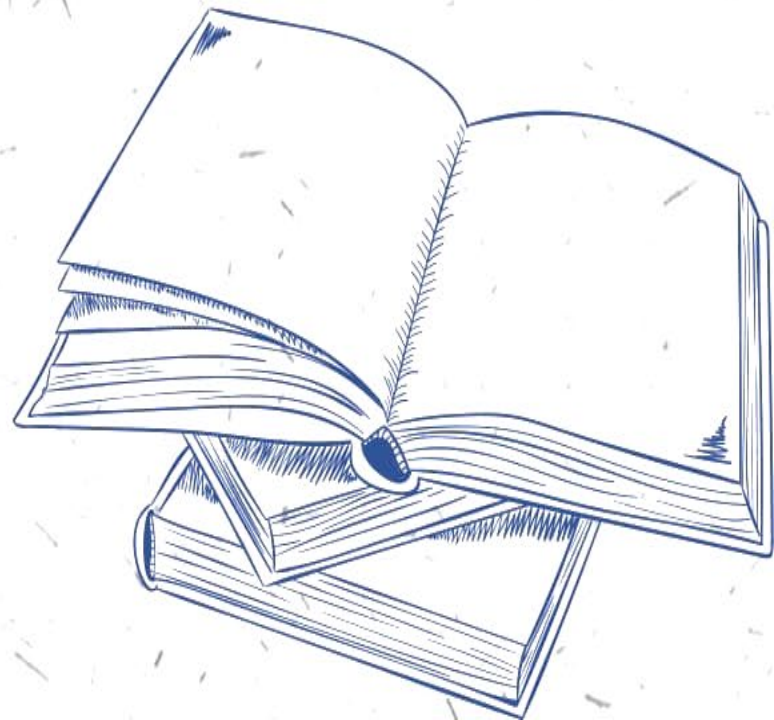
## CONTENTS

**1 课题背景**

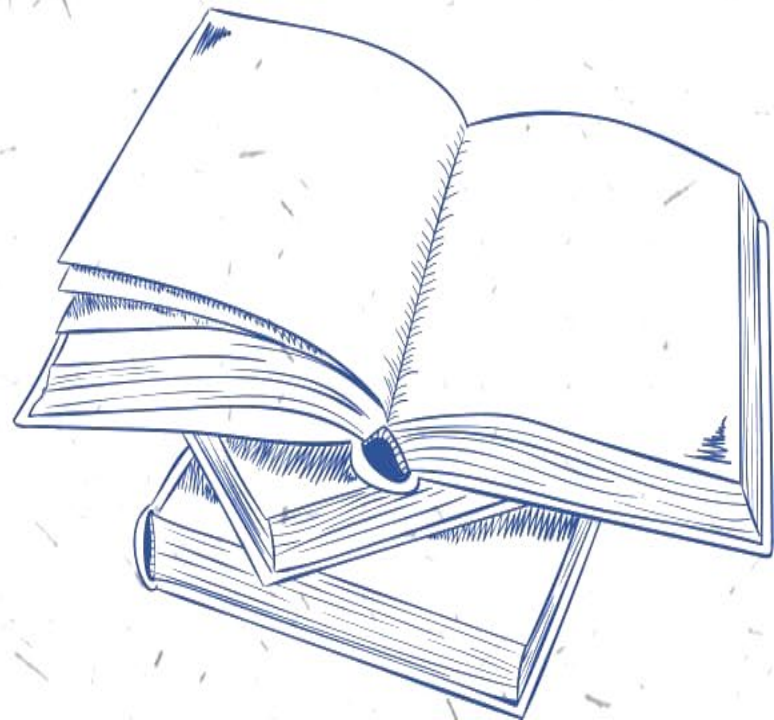
**2 应用场景**

**3 原理概述**

**4 仿真建模**



# 课 题 背 景



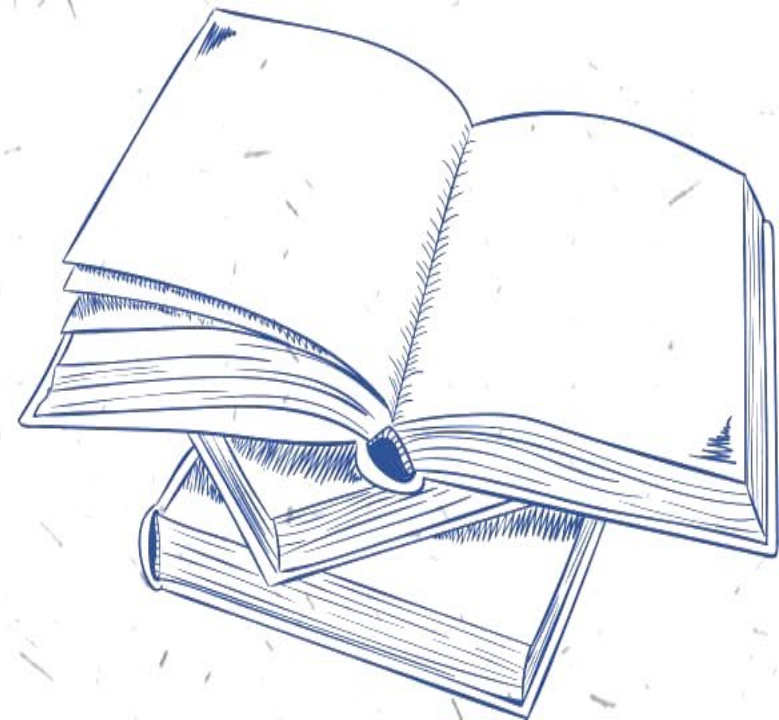


## 课题背景

可重构天线旨在通过改变天线的物理特性参数，使天线的某些辐射特性根据应用场景和应用需求加以改变。**方向图可重构天线**可以满足通信空间分集需求，在保持天线工作频率和极化方式不变的情况下改变天线的最大辐射方向，即方向图主瓣方向。相比于全向天线，能提高指定方向上的信号辐射或接受质量，又减少了不必要的能量辐射；相比于定向辐射天线，可以在不增加天线数量的情况下增加通信系统的灵活度；相比于相控阵天线，可以避免巨大的天线阵列和复杂的馈电系统，并且能极大降低通信系统成本。



# 应 用 场 景

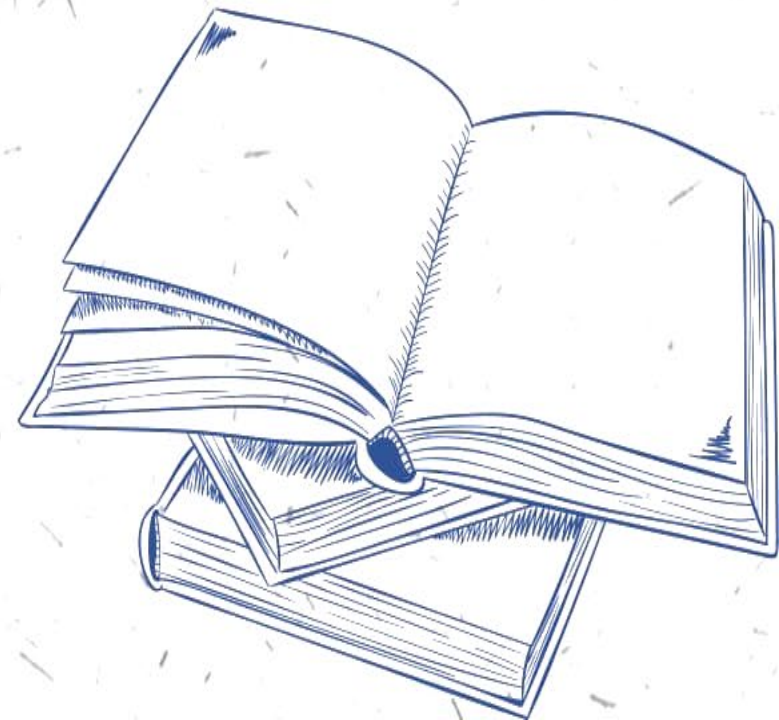




## 应用场景

在商业应用方面，作为5G通信中的关键技术，大规模天线技术通常使用密集天线阵列，但是密集排布的天线不但会占据大量空间，还会降低通信信道的自由度，因而限制了多路复用增益的提高，不利于通信性能的提高。相比之下，天线可重构技术可以在不增加天线数量的情况下，通过天线空间分集、辐射方向图分集或极化分集技术，降低子信道的相关性，进而提高通信系统容量。另外，在移动卫星通信中，车载、船载、机载等移动卫星通信应用的需求愈发强烈，人们更希望交通工具在移动过程中保持卫星通信。但由于汽车、船只、飞机等移动交通工具在移动过程中位置和姿态不断变化，普通天线难以保持辐射方向始终与通信卫星对准。而波束可重构天线可以根据交通工具的位置等信息计算出卫星相对位置，改变天线辐射方向，使交通工具在移动中实时保持卫星通信。

# 原理概述



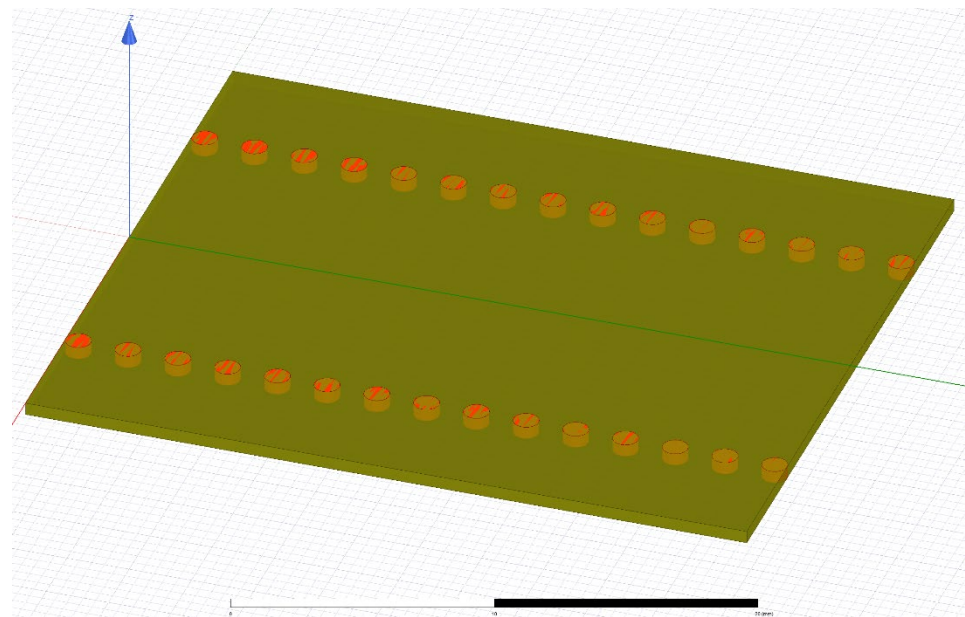


# 基片集成波导

基片集成波导是一种周期性结构，通常在PCB、LTCC上打金属过孔，起到金属电壁的作用，使电磁波被限制在通孔和金属平面共同形成的介质填充矩形波导内传输。基片集成波导上面的金属通孔为了减少损耗和电磁波泄露，需要满足如下条件：

$$s < 2d, d < 0.2w$$

其中 $d$ 表示金属通孔直径； $s$ 代表金属通孔排列周期，即相邻两通孔间的距离； $w$ 表示两排金属通孔之间的距离。

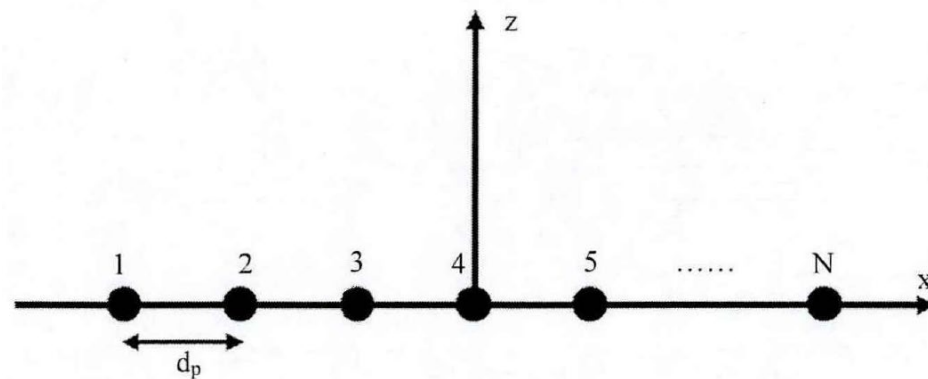






# 原理概述

基于单元相位调控的波束可重构天线，通过控制每个辐射单元的补偿相位，实现波束辐射方向的可重构特性。一维辐射单元按照图的方法等间距周期性排列，图中黑点表示沿 $x$ 轴放置的单元。



设相邻单元间隔距离为 $d_p$ ，具有这种排列结构的天线期望辐射波束的偏角为 $\theta$ 时，所需各个位置单元泄露出的电磁波应具有如下相位：

$$\Phi_{\text{exp}} = -k_0 \cdot \sin\theta \cdot (n \cdot d_p) + \Phi_{\text{exp}0}, n = 1, \dots, N$$

其中 $k_0$ 表示自由空间波数， $n$ 为单元序列号， $\Phi_{\text{exp}0}$ 表示起始相位。



# 原理概述

实际上, 电磁波在沿波导结构传送至各个单元位置时的相位为:

$$\Phi_{\text{real}} = -k_g \cdot (n \cdot d_p) + \Phi_{\text{real}0}, \quad n = 1, \dots, N$$

$\Phi_{\text{real}0}$ 表示起始相位,  $k_g$ 为电磁波在导波结构中传播的波数,  $k_g$ 的计算方法为:  $k_g = k_0 \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$

综上, 各个单元需要补偿的相位为:

$$\Phi_{\Delta} = \Phi_{\text{exp}} - \Phi_{\text{real}} = (k_g - k_0 \sin \theta) \cdot n \cdot d_p + \Phi_0, \quad n = 1, \dots, N$$

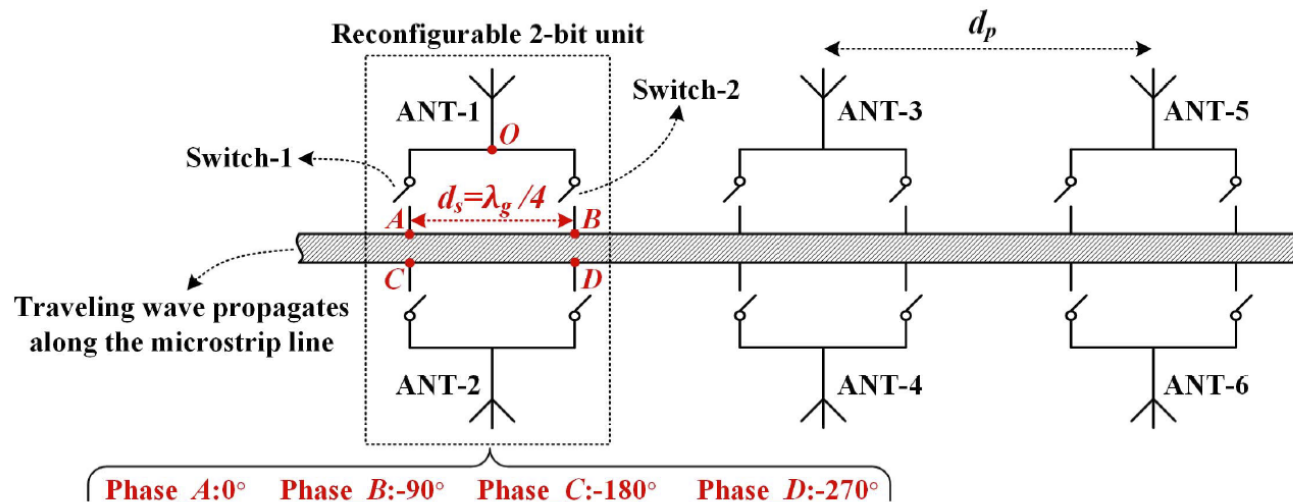
在计算每个单元的补充相位时, 合理设计 $\Phi_0$ 可以提高波束的辐射方向精度。在天线设计中, 辐射单元沿导波结构等间距排列, 每个单元通过改变与导波结构相连的位置实现不同的相位补偿。



# 原理概述

每个单元与导波结构的连接方式有限，以2-bit为例，如右图：

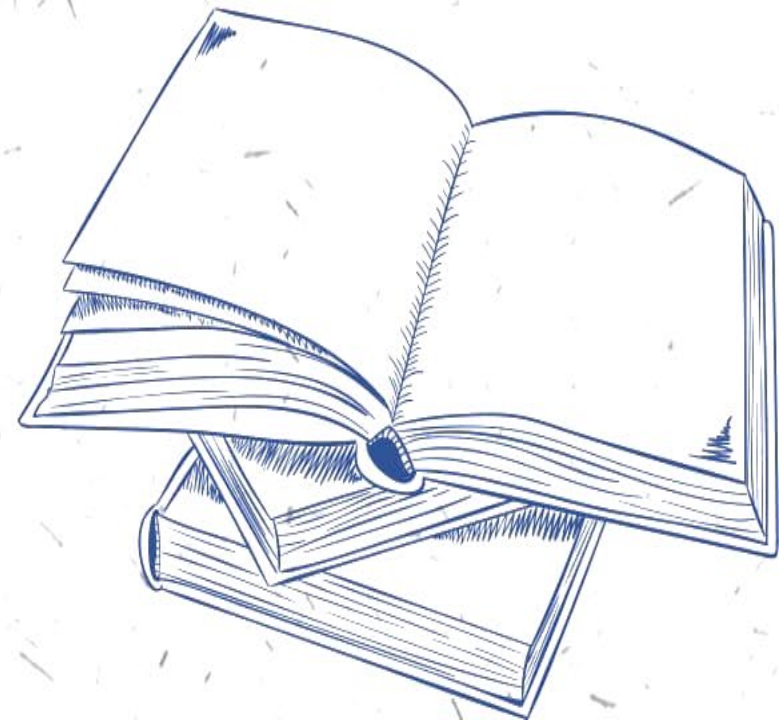
辐射单元按一维等间距周期排列，相邻两单元相距 $d_p$ 距离，约为工作频率对应自由空间波长的一半。每个单元中，有两个漏波结构对称排列于导波结构两侧，2-bit编码的辐射单元有四种位置可与导波结构相连(图中A,B,C,D所示)，这四个位置分别编码为1,2,3,4。每次仅取一个位置与导波结构相连，由于每个漏波结构的两个连接位置相邻距离 $d_s$ 为四分之一介质波长，且漏波结构关于导波结构对称。



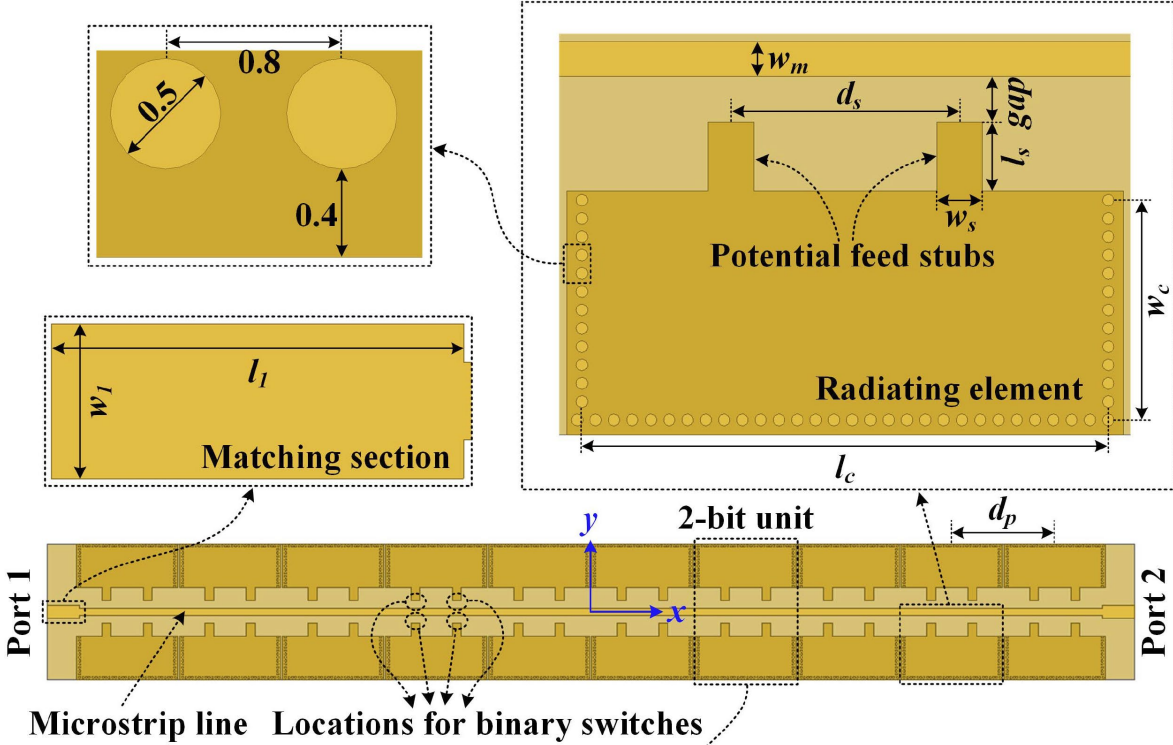
故A,B,C,D连接上导波结构分别可以补偿相位： $0^\circ, -90^\circ, -180^\circ, -270^\circ$   
将各个单元相位补偿公式计算所得结果数字化对应2-bit的标准如下：

$$\Phi = \begin{cases} 0^\circ & \Phi_\Delta < -315^\circ \text{ or } \Phi_\Delta \geq -45^\circ \\ -90^\circ & -135^\circ \leq \Phi_\Delta < -45^\circ \\ -180^\circ & -225^\circ \leq \Phi_\Delta < -135^\circ \\ -270^\circ & -315^\circ \leq \Phi_\Delta < -225^\circ \end{cases}$$

# 仿真建模

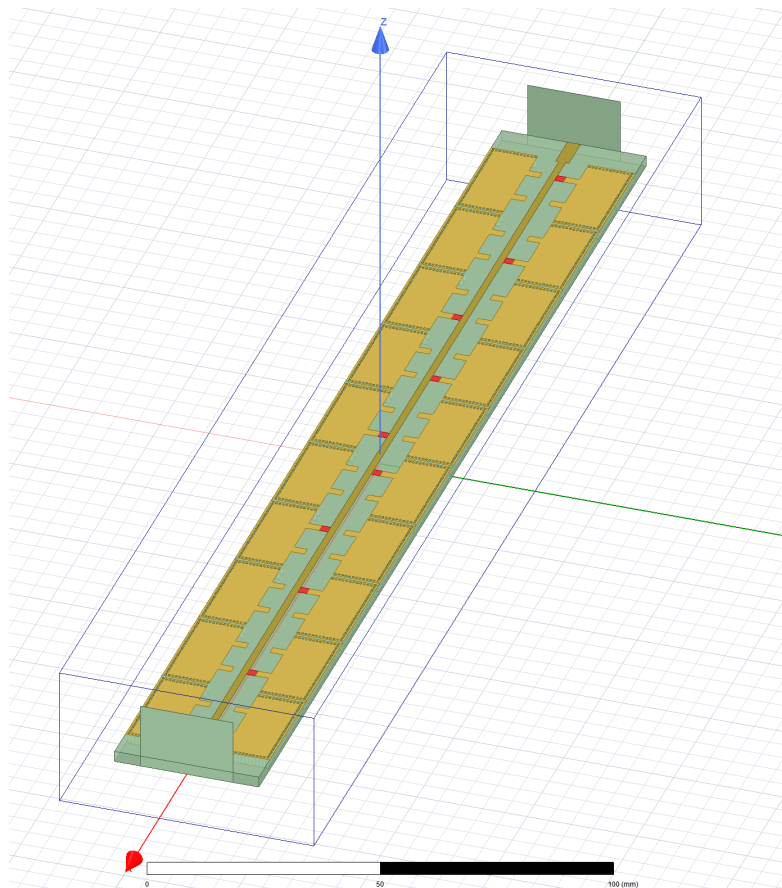






天线设计参数

参数	$l_c$	$w_c$	$l_s$	$w_s$	$d_s$
值 (mm)	23	9.6	3	2	10
参数	$w_m$	$gap$	$l_1$	$w_1$	$d_p$
值 (mm)	1.5	2	8	3	25



共计**10**组对称排列  
于微带线两侧的基片，  
图中**红色方块**表示基  
片与微带线的连接点



# 仿真建模

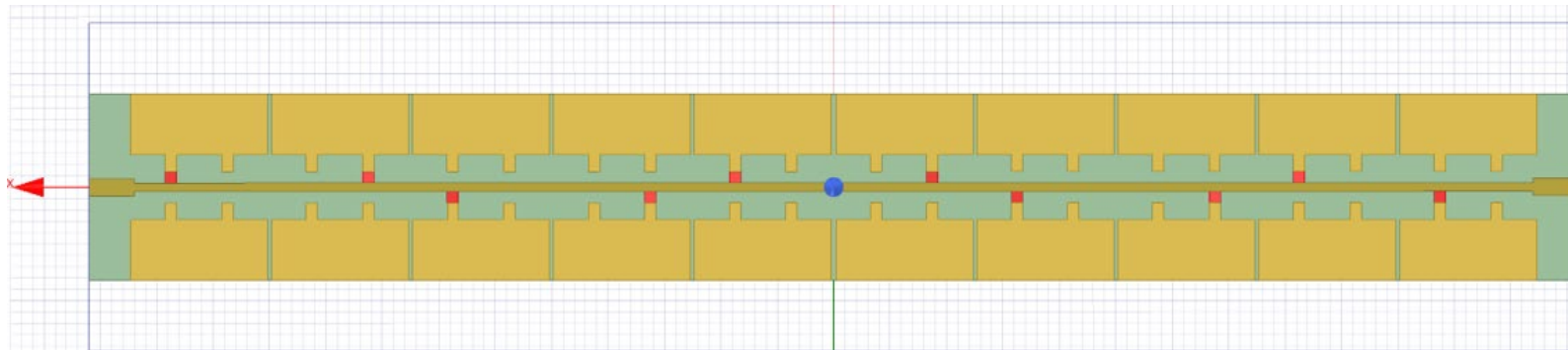
根据理论公式，分别验证偏转角为 $-25^{\circ}$ ， $0^{\circ}$ 以及 $50^{\circ}$ 三种情形，计算可得这三种情形下10个单元连接方式分别为：

目标 角度	Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6	Unit7	Unit8	Unit9	Unit10
$-25^{\circ}$	1	2	3	4	1	2	3	4	1	3
$0^{\circ}$	1	3	4	2	4	1	3	1	3	4
$50^{\circ}$	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4

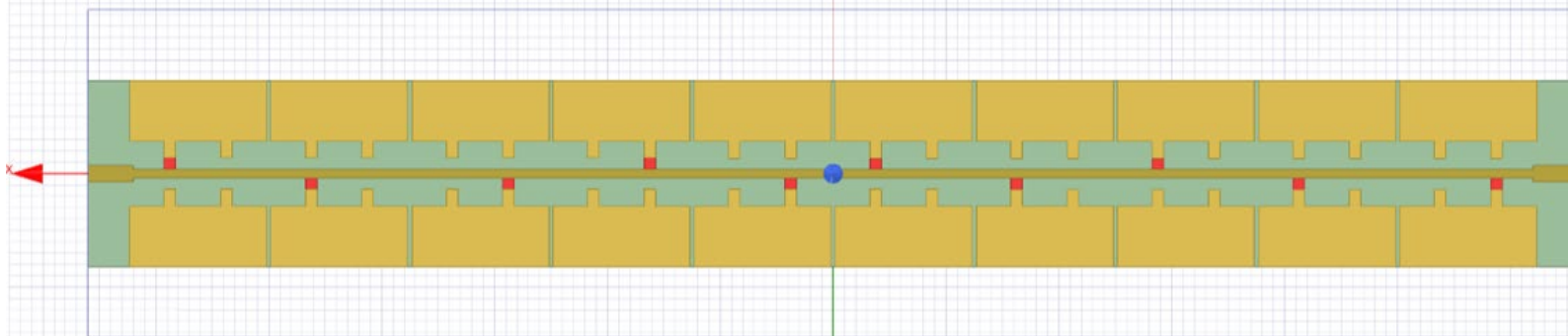


# 仿真结果

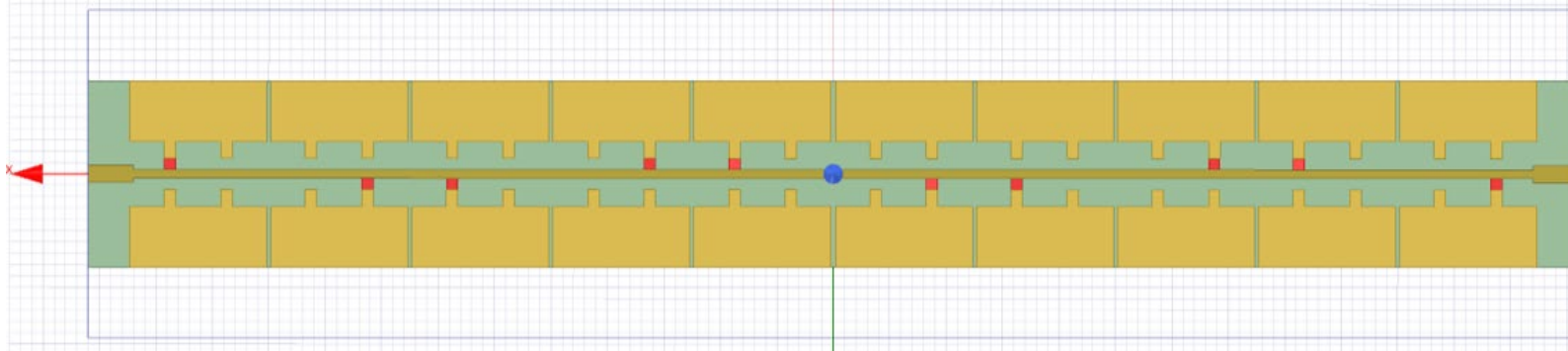
$$\theta = -25^\circ$$



$$\theta = 0^\circ$$



$$\theta = 50^\circ$$

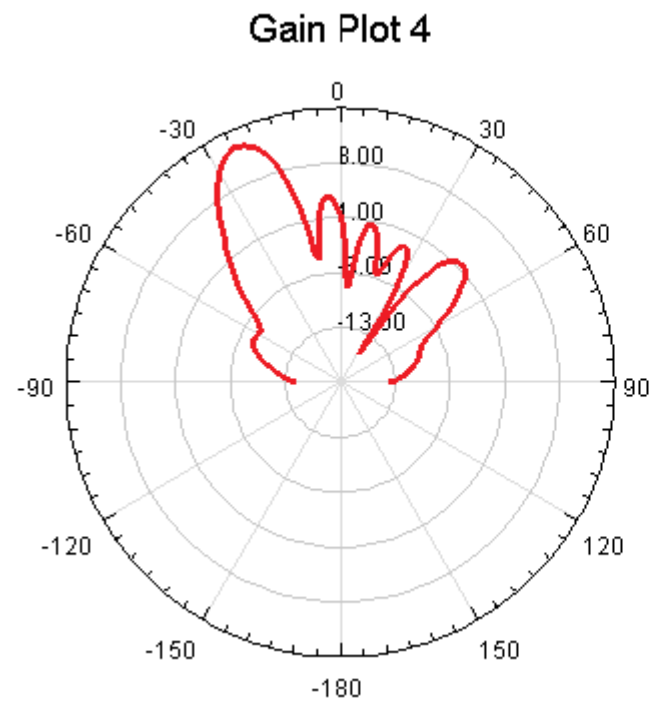






# 仿真结果

实际波束方向角  $\theta = -25^\circ$



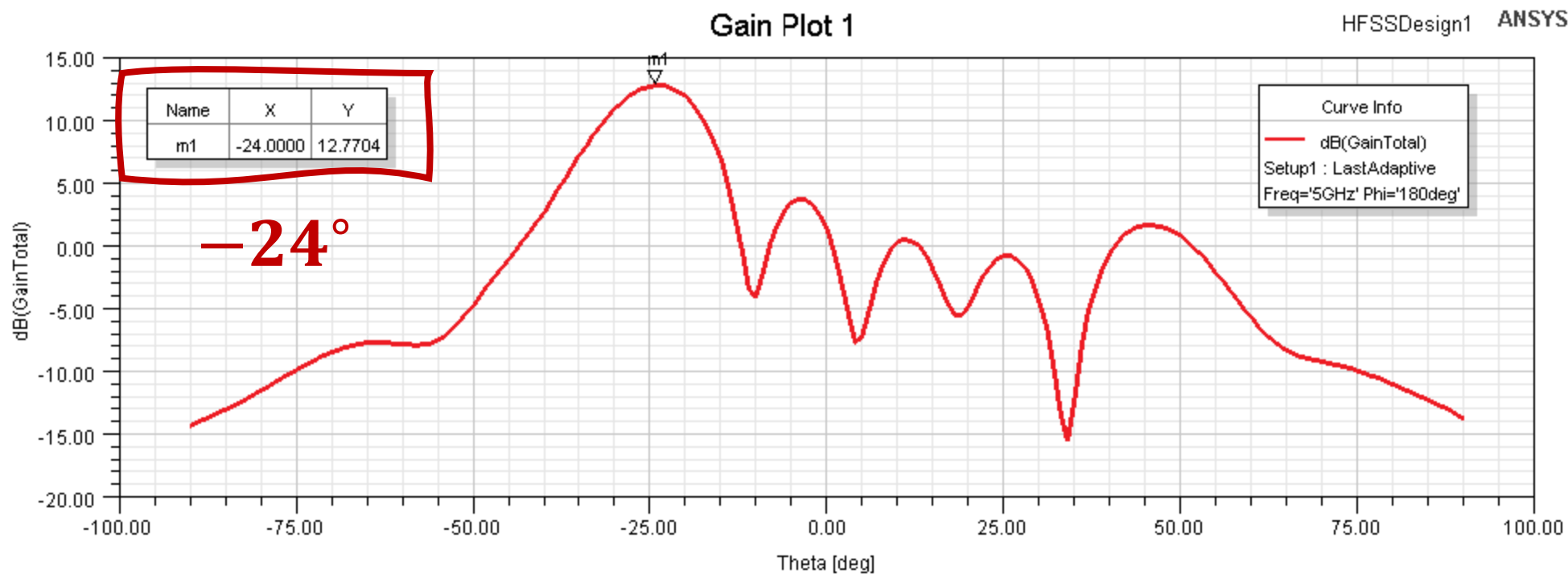
HFSSDesign1 ANSYS

Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Freq='5GHz' Phi='180deg'



# 仿真结果

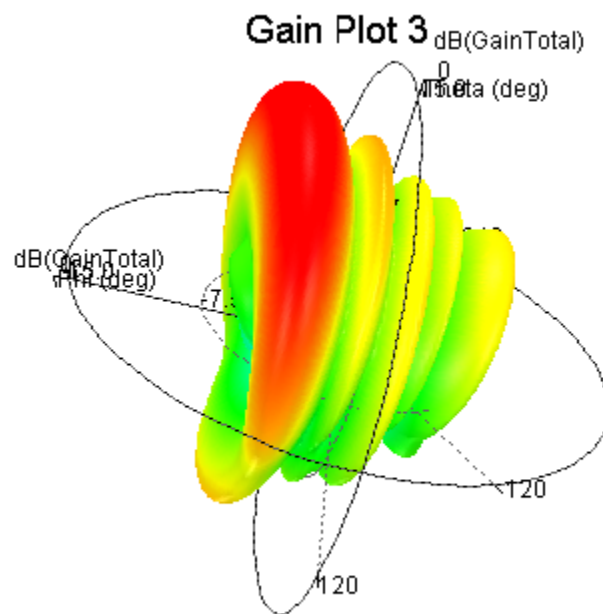
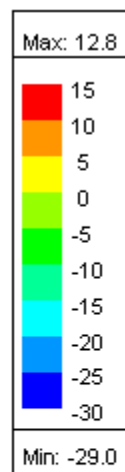
实际波束方向角  $\theta = -25^\circ$





# 仿真结果

实际波束方向角  $\theta = -25^\circ$

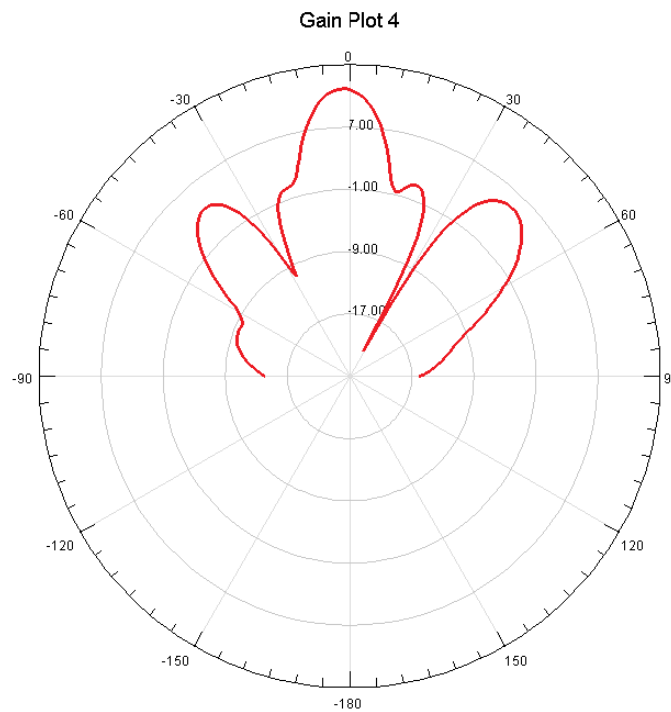
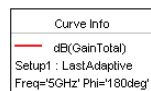


ANSYS



# 仿真结果

实际波束方向角  $\theta = 0^\circ$

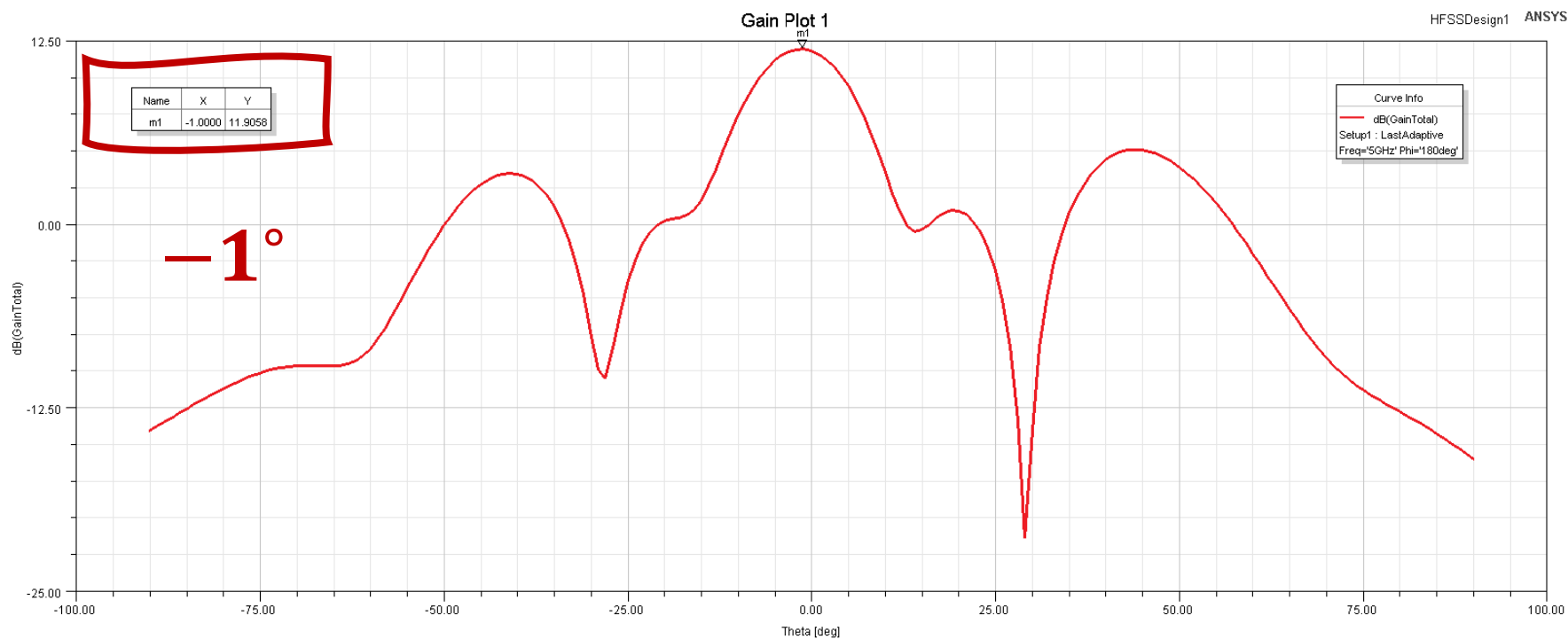






# 仿真结果

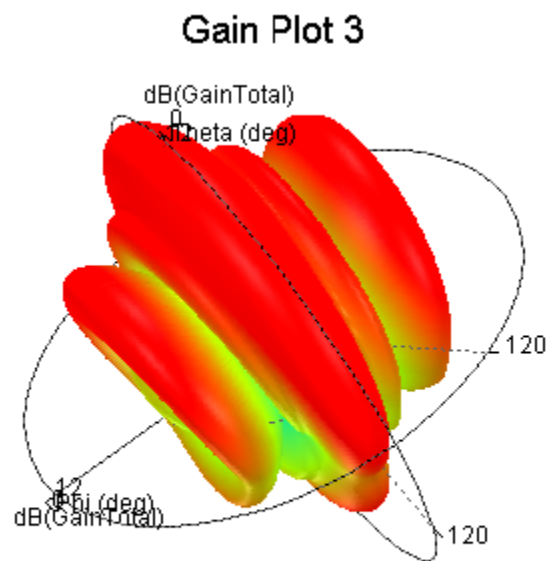
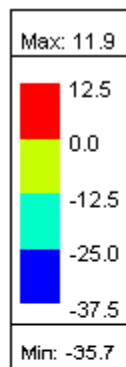
实际波束方向角  $\theta = 0^\circ$





# 仿真结果

实际波束方向角  $\theta = 0^\circ$

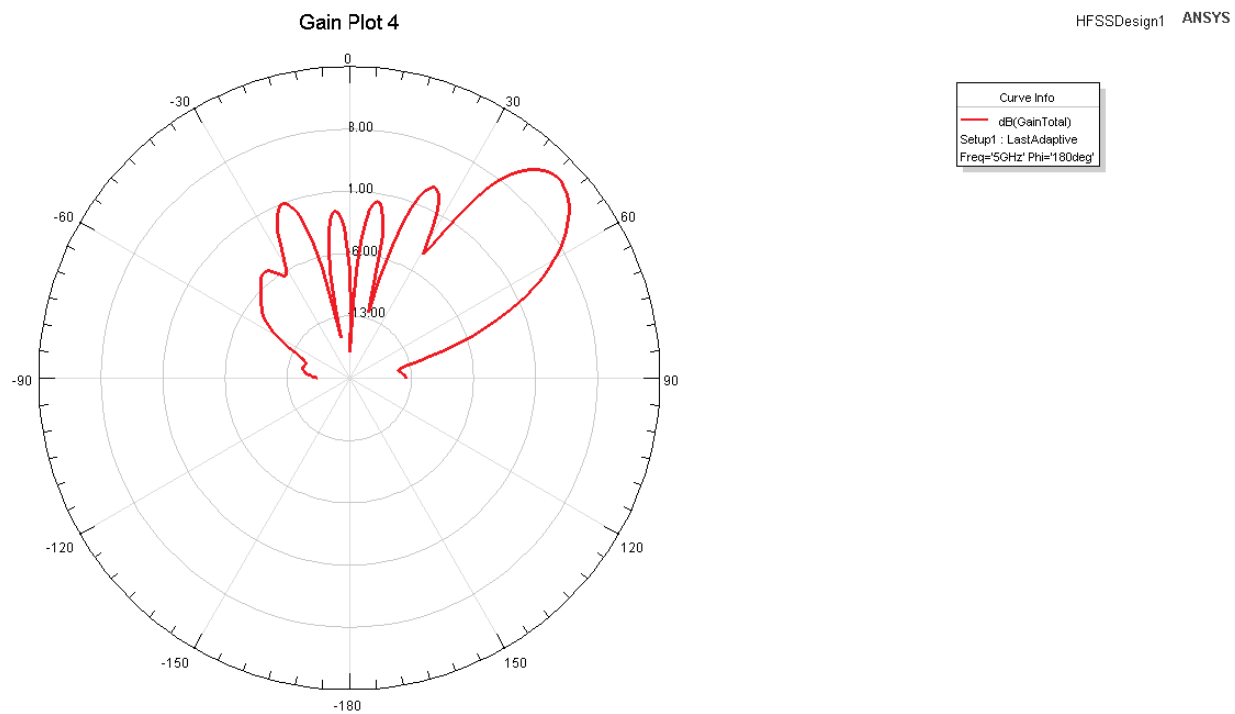


ANSYS



# 仿真结果

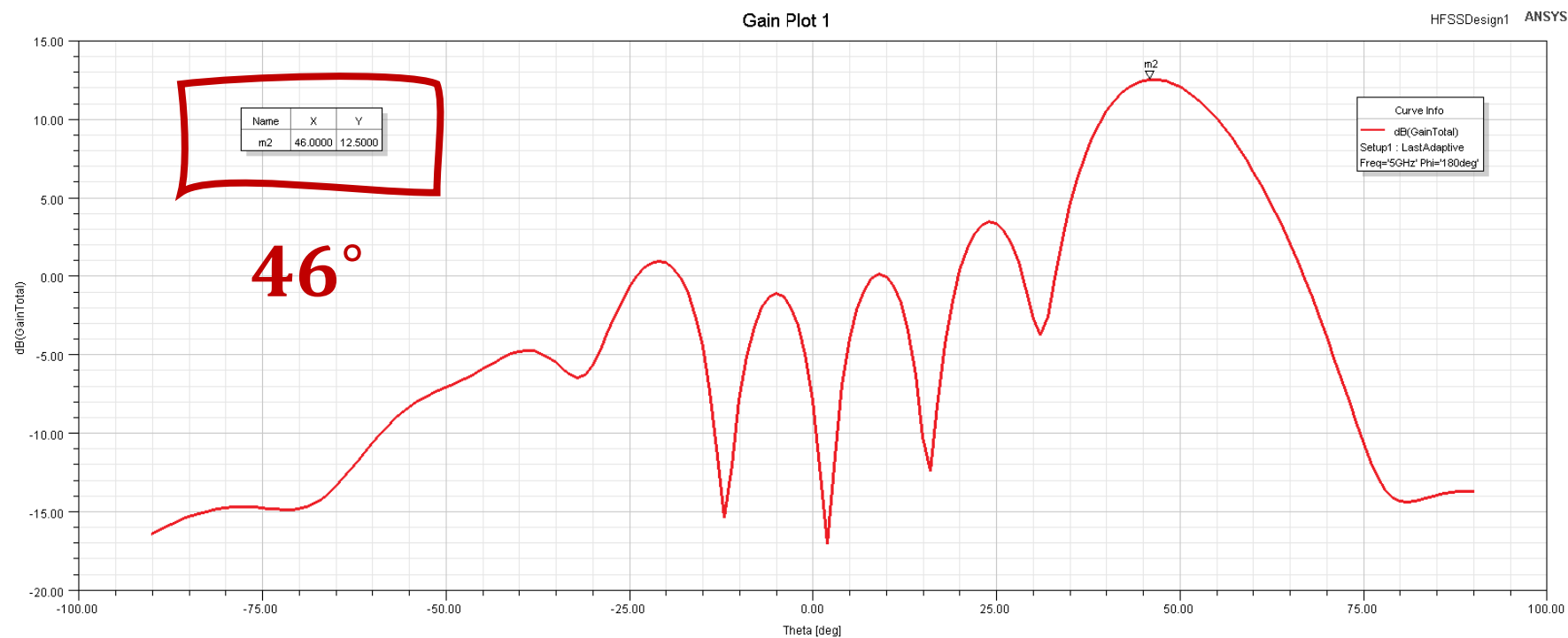
实际波束方向角  $\theta = 50^\circ$





# 仿真结果

实际波束方向角  $\theta = 50^\circ$

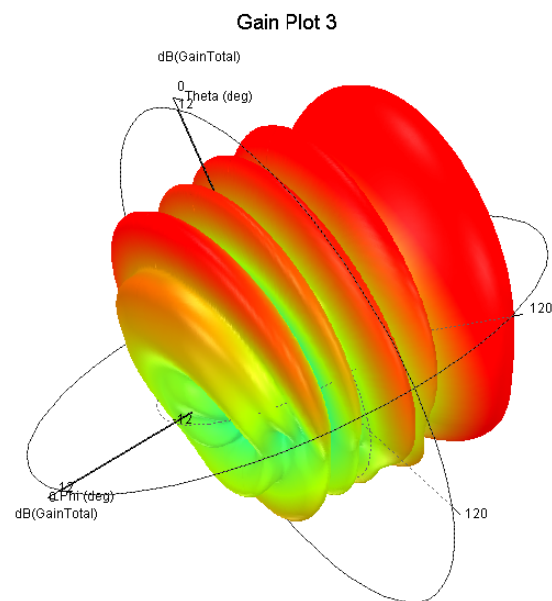
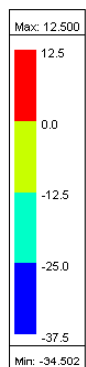






# 仿真结果

实际波束方向角  $\theta = 50^\circ$



ANSYS



对比文献结果

TABLE III  
ARRAY CONFIGURATIONS FOR SEVERAL TARGET SCAN ANGLES, AND THE ACTUAL SCAN ANGLES (AT 5 GHz)

Target scan angle	Array configuration										Realized angle
	Unit1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Unit 7	Unit 8	Unit 9	Unit 10	
-50°	1	1	2	2	3	3	3	4	4	1	-48°
-25°	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	-25°
0°	1	3	4	2	4	1	3	1	3	4	-1°
25°	1	3	2	4	3	1	4	2	1	3	26°
50°	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	46°

\*States expressing the array configuration is simplified: State-1 is replaced with “1”, and so on.

上表为文献<sup>[1]</sup>中的给出的相同结构波束可重构天线角度调整的理论与实际角度对比结果。本次课程报告，我选择其中的三个角度进行复现（-25°，0°以及50°），从仿真结果可以看出，复现的结果和原文献中的结果一致。

[1]. L. Chang, Y. Li, Z. Zhang and Z. Feng, "Reconfigurable 2-bit Fixed-Frequency Beam Steering Array Based on Microstrip Line," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 2, pp. 683-691, Feb. 2018.



# 报告总结

本次课程设计复现了论文[1]中设计的基于微带线与基片集成波导技术的可重构天线。组合调节连续等间距排列于微带线上的单元与导波连接模式可构成对准不同角度的波束。调节方式易于计算, 为波束可重构天线设计提供了简单有效的方法。

---

[1]. L. Chang, Y. Li, Z. Zhang and Z. Feng, "Reconfigurable 2-bit Fixed-Frequency Beam Steering Array Based on Microstrip Line," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 2, pp. 683-691, Feb. 2018.



## 参考文献

1. 刘丽. 基于超表面的波束可重构天线技术研究[D]. 2019.
2. L. Chang, Y. Li, Z. Zhang and Z. Feng, "Reconfigurable 2-bit Fixed-Frequency Beam Steering Array Based on Microstrip Line," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 2, pp. 683-691, Feb. 2018.
3. D. Deslandes and K. Wu, "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 11, no. 2, pp. 68-70, Feb. 2001.

为保障结果可复现，课程报告的工程文件及文档记录均托管于GitHub  
仓库中，地址如下：

<https://github.com/zouyu4524/RIS-impl>

工程通过 **ANSYS Electromagnetics Suite R2** 构建