

项目编号： 202304034

东南大学

大学生创新创业训练计划项目

结题报告

项目名称 平面龙伯透镜多波束调控机理和方法研究

项目级别 ☐校级重大 ☐校级重点

☒校级一般 ☐院级

项目负责人 陈航 学号： 04021714

所属学院 信息科学与工程学院

项目成员 郭响 学号： 04021414

汪书昕 学号： 04021113

指导教师 张彦（信息科学与工程学院）

摘 要

球形龙伯透镜有着宽角度多波束的性能实现，但由于其球体结构使得其使用实际使用和安装中存在诸多不便。为拓展龙伯透镜的适用范围，我们根据光学变换原理，将球形龙伯透镜进行了平面化设计，使其具有规整的外形轮廓。通过建模仿真，并于原球形龙伯透镜对比，验证了所设计平面化龙伯透镜的优良增益特性。在得到和球形龙伯透镜基本一致的增益条件下能够大幅度减少副瓣，使得电磁波波束能量大幅度汇聚使得通信系统更加高效、节能。然而，失去球形结构的平面龙伯透镜同样失去了龙伯透镜无差别焦点特性，其波束扫描特性受限。为此，在平面龙伯透镜上实现宽角度多波束设计，我们创新性设计了能够改变波束相位的超表面单元，并验证了超表面加载对平面龙伯透镜的波束相位的可控性。

关键词：龙伯透镜；超表面；波束偏转；多波束透镜天线；相位梯度；3D 打印

ABSTRACT

Spherical Lombard lenses have wide-angle multi-beam performance realization, but their spherical structure makes their use inconvenient for practical use and installation. In order to expand the scope of application of the Lombard lens, we planarized the spherical Lombard lens according to the principle of optical transformation, so that it has a regular profile. Through modeling simulation and comparison with the original spherical Lombard lens, the excellent gain characteristics of the designed planarized Lombard lens are verified. The gain conditions are basically the same as those of the spherical Lombard lens, and the secondary flap can be greatly reduced, so that the electromagnetic wave beam energy can be greatly converged to make the communication system more efficient and energy-saving. However, the planar Lombard lens, which has lost its spherical structure, also loses the undifferentiated focal point characteristic of the Lombard lens, and its beam scanning characteristics are limited. In order to realize a wide-angle multibeam design on planar Lombard lenses, we innovatively designed a super-surface unit capable of changing the beam phase, and verified the controllability of super-surface loading on the beam phase of planar Lombard lenses.

Keywords: Lombard lens; hypersurface; beam deflection; multibeam lens antenna; phase gradient; 3D printing

目 录

摘 要	II
ABSTRACT	III
目 录	IV
第一章 绪论	1
1.1 项目背景及意义	1
1.2 技术路线	1
1.3 特色与创新体现	1
第二章 球形龙伯透镜与平面龙伯透镜	2
2.1 球形龙伯透镜的原理、设计过程及结果分析	2
2.1.1 球形龙伯透镜的设计原理	2
2.1.2 设计过程及结果分析	2
2.2 平面龙伯透镜的设计过程及结果分析	7
2.3 球形龙伯透镜与平面龙伯透镜的对比	12
第三章 平面龙伯透镜的相位梯度超表面及波束偏转	13
3.1 平面龙伯透镜的相位梯度超表面的研究	13
3.1.1 相位梯度超表面原理	13
3.1.2 模型设计过程	13
3.1.3 仿真结果分析	15
结论	16
参考文献	17
附录	18
项目成果简介	18
文献综述	19
心得体会	23
展板	25

第一章 绪论

1.1 项目背景及意义

随着 5G 无线通信系统的逐步商用化，可以预见相关的毫米波基站布局密度将是现有基站的数倍乃至数十倍。毫米波频段电磁波传输衰减较微波频段十分明显，因此需要提高天线增益来实现覆盖深度提升。同时，毫米波天线还需具有良好的角度（宽度）覆盖能力。为了同时实现所需的覆盖宽度和覆盖深度，多波束天线成为 5G 和未来通信系统中普遍采用的解决方案。本 SRTP 项目针对多波束天线的设计需求，选择平面化龙伯透镜天线作为研究对象，基于龙伯天线表面无差别焦点特性，实现具有各向性能相同的宽角度多波束设计，主要采用建模和模拟方式研究平面化龙伯透镜天线设计方法及平面化对波束的影响，并考虑结合超表面技术加载方案提升多波束的调控和变换能力，并设计 1-2 个具有实用性的 5G 天线原型进行验证。

1.2 技术路线

本项目的主要研究内容包括：研究平面龙伯透镜天线设计方法及平面化对波束的影响，通过加载超表面实现大角度波束扫描和极化变换，并设计一两个具有实用性的 5G 天线原型验证两部分。针对这三部分的技术路线如下：

1、研究平面龙伯透镜天线设计方法及平面化对波束的影响

通过文献调研，了解平面化龙伯透镜天线的原理及研究进展，学习龙伯天线表面无差别焦点特性，并利用电磁仿真软件 HFSS 来建模和模拟研究平面龙伯透镜天线设计方法及平面化对波束的影响。具体而言，基于坐标变换下麦克斯韦方程的不变形，利用变换光学方法设计平面化龙伯透镜的本构参数矩阵，并对得到的各向异性矩阵进行设计近似。进一步分析其平面化和本构参数矩阵近似对透镜汇聚能力、出射波阵面的影响，形成平面设计参数与性能退化间定量的分析曲线，用于指导后续设计。特别，将系统比较平面透镜法向出射波束与原始球形龙伯透镜之间的性能差异。

2. 通过加载超表面实现大角度波束扫描和极化变换

通过设计具有极化扭转能力的超表面单元，并设计成超表面加载于平面龙伯透镜出射口面，实现线极化的正交扭转、线极化和圆极化的转换设计。通过设计具有二维梯度分布的组合超表面，设计具有平面内可控任意梯度分布的超表面并加载于平面龙伯透镜出射口面，实现对波束指向的调控，以实现大角度波束扫描。

3、设计具有实用性的 5G 天线原型验证

基于内容 1 的理论研究内容和仿真结果，根据计算和仿真得出的理论透镜设计参数，采用等效媒质法，用 3D 打印结构实现等效透镜设计，通过编写脚本语言方式在 HFSS 中完成平面化龙伯透镜天线的全部建模。同时，设计与平面龙伯透镜相配的平面馈源作为激励，并完成平面龙伯透镜的实验验证。再此基础上，基于内容 2 的超表面设计，利用 3D 工艺完成相关实物加工，并加载与龙伯透镜进行实验验证。

1.3 特色与创新体现

1. 本项目面向 5G 毫米波无线通信技术需求，研究成果预期具有广泛的应用性；
2. 本项目研究的平面化龙伯透镜具有低剖面特性，实现了与馈源的一体化集成设计；
3. 本项目采用了超表面加载技术提升龙伯透镜出射波束的调控能力。

第二章 球形龙伯透镜与平面龙伯透镜

2.1 球形龙伯透镜的原理、设计过程及结果分析

2.1.1 球形龙伯透镜的设计原理

龙伯透镜是由物理学家 Luneburg 提出的一种折射率连续渐变的球形透镜。光进入球体，根据折射率的变化不断发生偏转，而后汇聚至一点。球形龙伯透镜对光的偏转性同样可以用到电磁波上，以进行对电磁波的收发。由于理想龙伯透镜的球对称性，当馈源的位置在龙伯透镜表面不断移动时，出射波的口径面也不断移动，可以在表面有多个馈源的叠加，从而使出射电磁波覆盖范围增大。

理想龙伯透镜的相对介电常数满足 $\epsilon_r = 2 - (\frac{r}{R})^2$ ，式中 R 为球形龙伯透镜的最大半径， r 是透镜内一点到球心的距离。由于现实世界中无法得到介电常数连续变化的理想介质，因此只能将理想球型龙伯透镜离散化。理论上龙伯透镜层数越多，其介电常数越趋近连续变化，对于波束的收敛和发散效果越好。为验证这一理论的正确性，我们建立了不同层数的龙伯透镜，仿真对比具体数值验证了球壳数对增益有着明显影响这一结论。

然而即便是离散化的球型龙伯透镜，想要在现实世界找到介电常数一一对应的介质依旧是很困难的，据此，我们决定将龙伯透镜小单元化，在使用同一介质材料的基础上，通过改变每层的占空比来达到所需的相对介电常数。在这一部分，我们创新性提出利用 3D 打印技术得到该球形透镜（实验室的 3D 打印材料介电常数为 2.88）。通过对比小单元增益和先前等厚龙伯透镜增益情况，可以看到两者并没有明显区别。而后我们将小单元的球体进行 3D 打印得到实物，计划后续将对实物进行验证，同仿真结果进行对比优化。

2.1.2 设计过程及结果分析

采用离散分层的球壳（最内层为实心球）方式逼近理想龙伯球的连续介电常数（折射率）分布。考虑到后续工作拟采用 3D 打印工艺进行加工，我们采用等厚球壳方案。根据理想龙伯透镜公式（ r 为每层球壳内半径和外半径平均值），可以求得每层介电常数。得到的最内层和最外层球壳的介电常数大致满足 1:2 的关系。

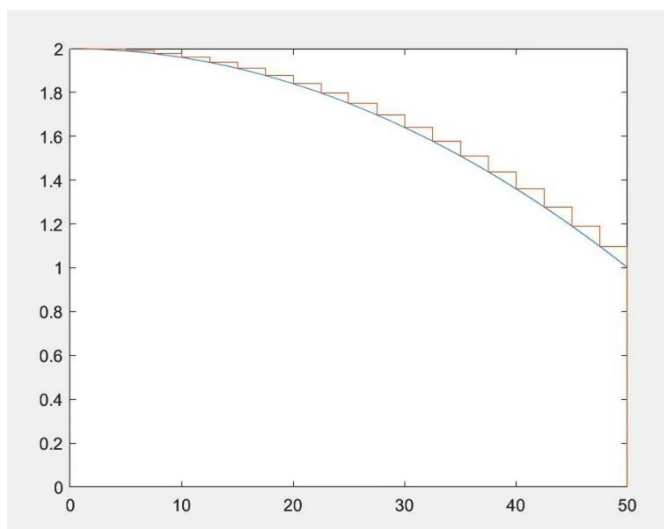


图 2-1 整个球体半径 50mm 介电常数和球壳厚度平均值拟合曲线

半径平均值(mm)	10.6	10.7	...	47.4	47.5
对应介电常数	1.9551	1.9542	...	1.1013	1.0975

表 2-1 半径平均值与对应介电常数部分数据

根据文献, 可知龙伯透镜增益情况同其层数有关, 层数越大, 离散误差越小, 对应实现的离散龙伯球的汇聚作用越好, 增益越高。由此, 我们选择建模了具有相同厚度为 5mm 的 7 层 (半径 35mm) 和 10 层 (半径 50mm) 龙伯透镜两种情况, 进行对比仿真, 以验证其性能与层数关系。这里并没有选取比 10 层更大的数量, 是因为过大的层数会导致仿真计算工作量骤增, 并且会逼近加工极限导致加工困难。根据文献记载, 5-12 层是一个较优的选择。

所设计的龙伯透镜工作于 28 GHz 频段, 因此选取激励源为 WR28 的开口矩形波导。为了对比说明龙伯透镜的汇聚作用, 我们先对激励源的开口波导辐射特性进行了仿真, 如下图所示。其方向性土呈现明显的宽波束, 最大增益仅 6.9dBi。

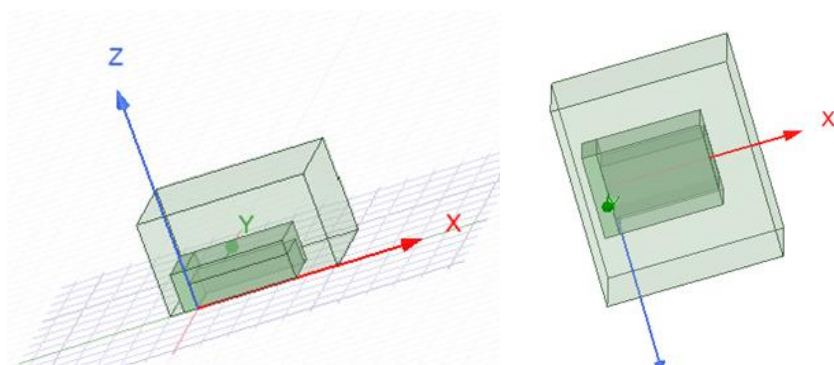


图 2-2 1/4 矩形波导模型对比完整矩形波导

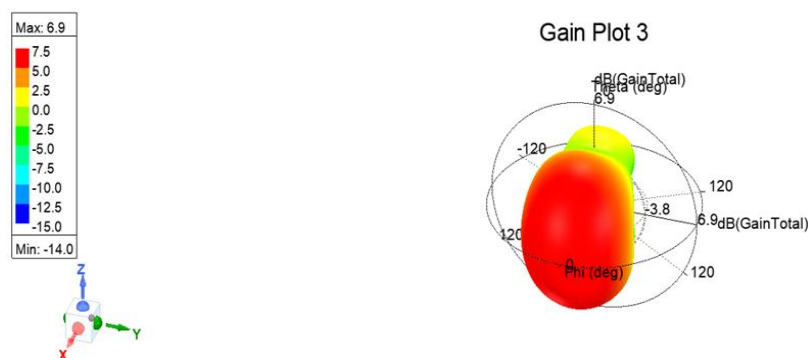


图 2-3 1/4 矩形波导 3D 辐射图

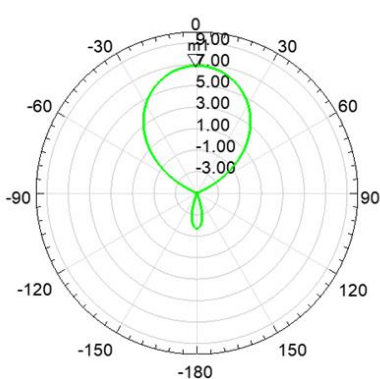


图 2-4 1/4 矩形波导 H 面方向图

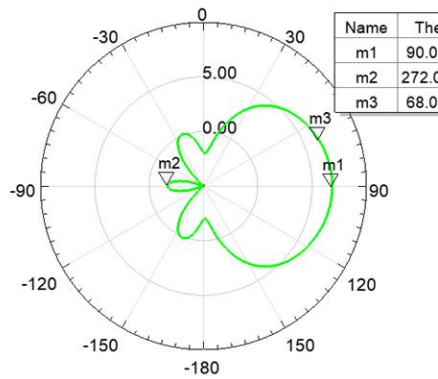


图 2-5 1/4 矩形波导 E 面方向图

将激励馈源与龙伯透镜进行整体仿真后的性能如下图所示。其中，具有 7 层结构的龙伯透镜增益为 24.9dBi，具有 10 层结构的龙伯透镜增益进一步加大为 27.9dBi。可以看出，龙伯透镜对馈源的辐射波进行了明显的汇聚提升，波束宽度明显变窄。并且，10 层比 7 层龙伯透镜效率高出一倍，增益提升 3dB。为此，在后续球形龙伯透镜设计中，我们将采用 10 层的设计方案。

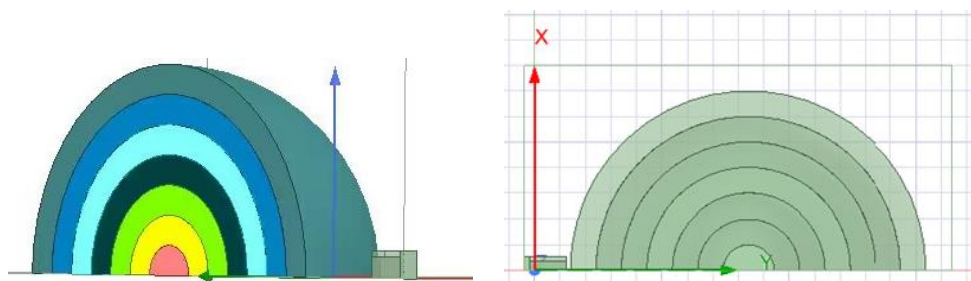


图 2-6 7 层 1/4 龙伯透镜

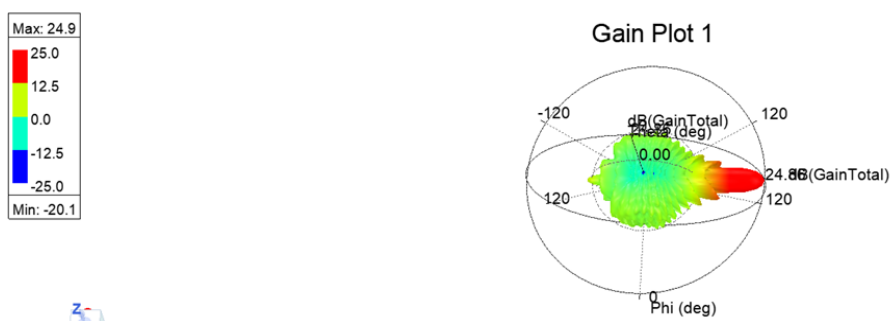


图 2-7 7 层龙伯球 3D 辐射图

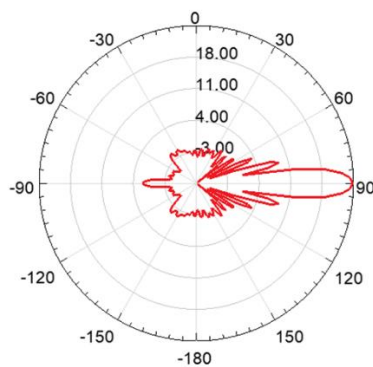


图 2-8 H 面方向图

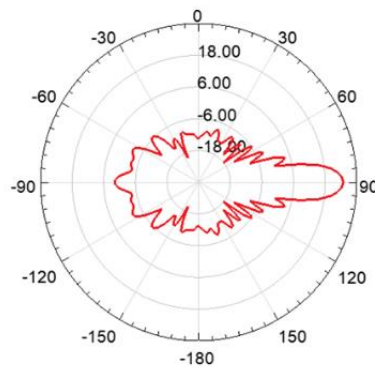


图 2-9 E 面方向图

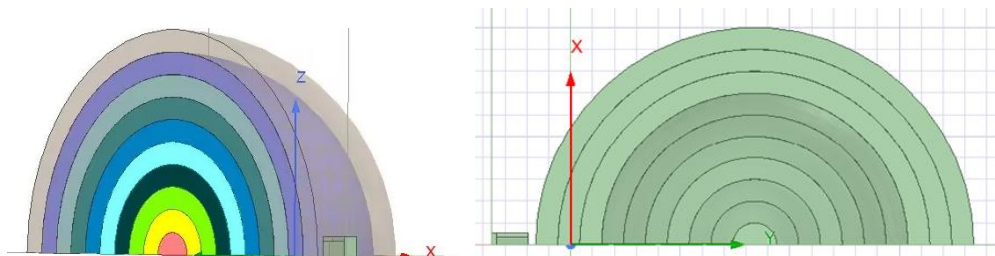


图 2-10 10 层 1/4 龙伯透镜

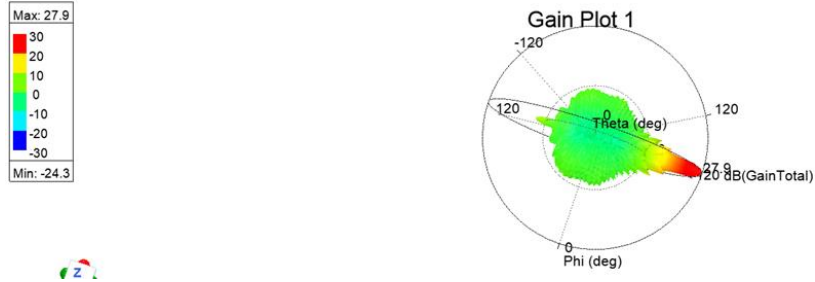


图 2-11 10 层龙伯透镜 3D 辐射图

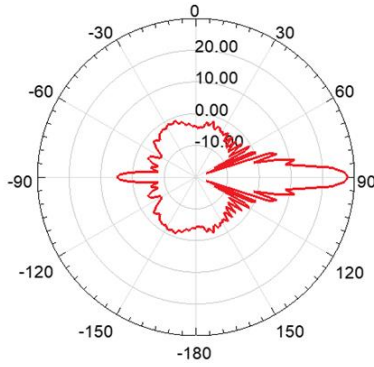


图 2-12 H 面方向图

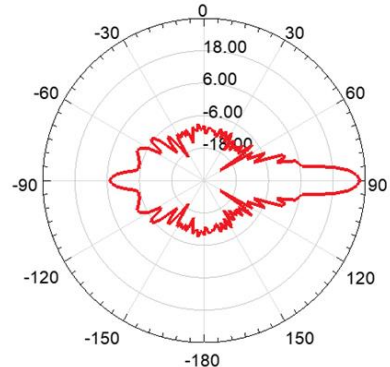


图 2-13 E 面方向图

而后进一步考虑将 10 层理想离散龙伯透镜单元化。为了对以上设计的 10 层龙伯透镜进行加工实验，我们拟创新采用 3D 打印工艺制造龙伯球。选用的 3D 打印树脂材料的介电常数为 2.9，损耗正切为 0.0035（实验室测定）。我们希望找到一种规则、结构清晰、具备一定稳定性的小单元结构，经过大量资料考察后，选择将离散化的龙伯透镜的每层球壳用边长为 2mm 的立方体小单元进行替换。考虑龙伯透镜工作频率为 28GHz，波长大致为 10.7mm，选取单元边长为 2mm，不超过 1/5 波长，可以获得较好的近似性。所提出的立方体单元采用三个互相正交的等尺寸树脂材料圆柱实现，其余为空气。通过调整三个圆柱的半径，可以实现在单元中空气和树脂材料占比的调控，从而实现等效介电常数的有效调节。选择使用三维正交圆柱体结构，其体积计算公式为：

$$V_{\text{三个正交圆柱}} = (16 - 8\sqrt{2})R^3$$

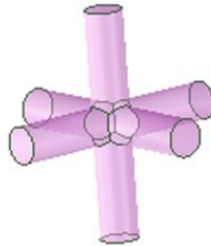


图 2-14 所提出的单元：三维正交圆柱体

在计算理想龙伯透镜每层介电常数公式中，发现斜率的绝对值逐渐增大，球壳厚度取值中间大边缘小。令整个球半径为 50mm，将 r 以 0.1 步长分别计算介电常数，从中选取适当值作为相应层数介电常数，如表 2-2 所示。

通过介质空气比，得到小单元理想介电常数 (ϵ) 同小圆柱体半径 (R) 的关系式：

$$\frac{1.9(16 - 8\sqrt{2})R^3}{8} + 1 = \epsilon$$

由于正交圆柱体的体积公式有误差，后期需要在原有计算基础上手动修正圆柱半径。修正方式为：将 2 mm 立方体介电常数分别设置为理想龙伯透镜每层对应介电常数，而后将等效正交圆柱体同小立方体分别进行仿真，对比两者 s 参数，手动修改令相差范围为 2 度左右。手动调整前后数据为：

球壳数（个）	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
球壳厚度 (mm)	10	10	6	6	5	4	3	3	2	1
理想介电常数	1.9900	1.9100	1.7884	1.6636	1.5239	1.3916	1.2775	1.1719	1.0784	1.0199
修改前圆柱半径 (mm)	0.9617	0.9351	0.8914	0.8417	0.7779	0.7060	0.6294	0.5365	0.4130	0.2615
手动修改后圆柱半径 (mm)	0.66	0.64	0.57	0.53	0.44	0.38	0.30	0.29	0.18	0.17

表 2-2 修改前后的圆柱半径数据

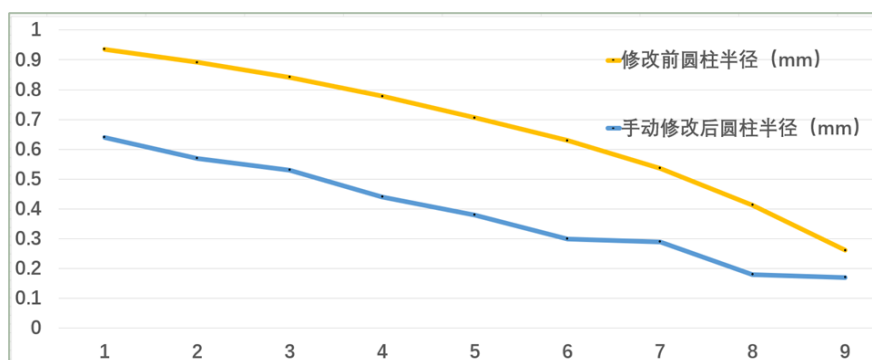


图 2-15 手动修改相对介电常数前后对比

经过修改后，将小单元组合起来进行仿真，得到其增益为 22.2dbi，较球形实心龙波球损失增益约 5dbi。

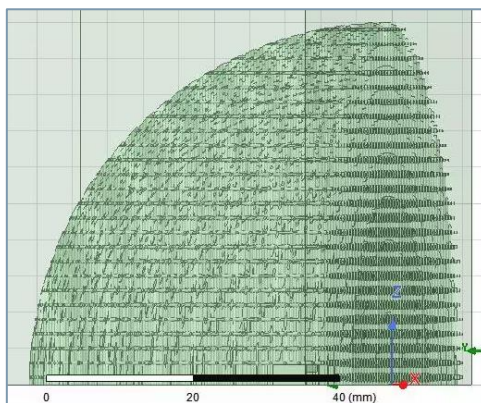


图 2-16 每层球壳用立方体小单元替换后的龙伯透镜

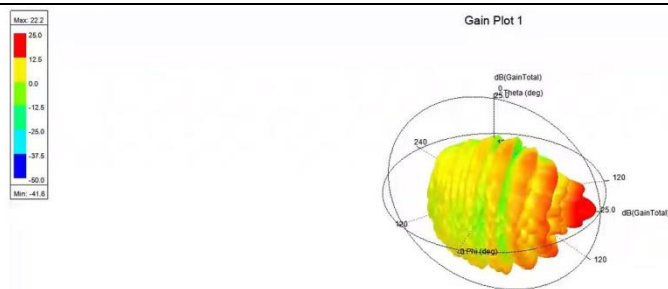


图 2-17 小单元等效龙伯透镜的 3D 辐射图

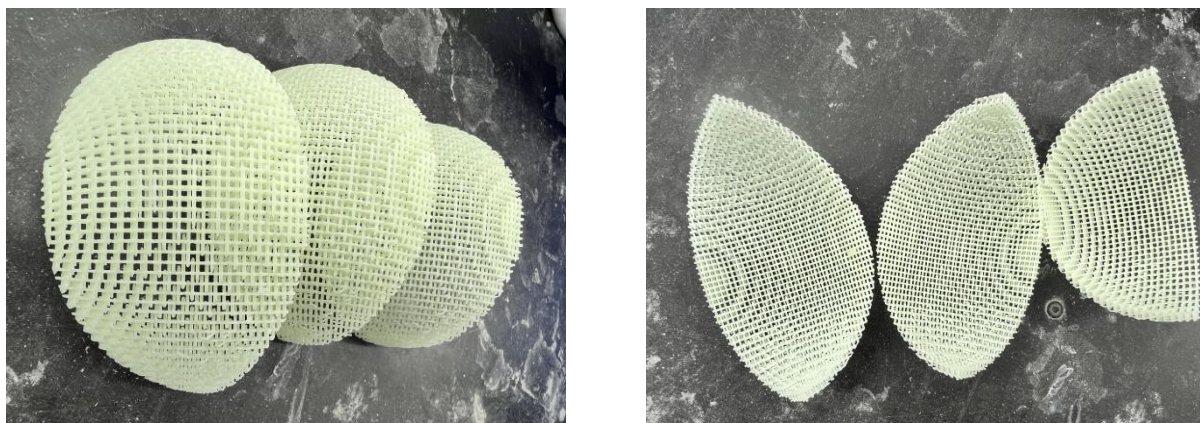


图 2-18 3D 打印的小单元等效龙伯透镜球壳（左：球壳外表面；右：球壳内表面）

2.2 平面龙伯透镜的设计过程及结果分析

球形龙伯透镜虽然具有良好的几何对称性，使得在其表面任意一点都能接收到同等大小的增益。同时由于其形状的特殊性，导致球型龙伯透镜的运用场景十分受限，平面龙伯透镜来源于球型龙伯透镜的几何光学变换，平面龙伯透镜能够更好地被固定或者放置在任意位置，但失去了球形龙伯透镜的相位可调控性。

由于球形龙伯透镜具备良好的几何对称性，因此只需要在二维空间进行坐标变换，经过旋转对称便可得到三维结构。

假设一个原始坐标 (x', y', z') 和一个经过变换后的新坐标 (x, y, z) ，再由雅克比矩阵：

$$\bar{\Lambda} = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(x', y', z')}$$



图 2-19 球形变换至平面图

转换介质的本构参数可以计算为（其中 ϵ_0 和 ϵ_1 分别为介质在原始空间的相对介电常数

和磁导率)：

$$\overline{\overline{\epsilon}} = \epsilon' \frac{\overline{\overline{\Lambda}} \overline{\overline{\Lambda}}^T}{|\overline{\overline{\Lambda}}|} \quad \overline{\overline{\mu}} = \mu' \frac{\overline{\overline{\Lambda}} \overline{\overline{\Lambda}}^T}{|\overline{\overline{\Lambda}}|}$$

平面变换的雅可比矩阵为：

$$\overline{\overline{\Lambda}}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{zy}{R^2 - y^2} & \frac{b}{\sqrt{R^2 - y^2}} \end{bmatrix}$$

利用上述公式在 MATLAB 中作图显示平面龙伯透镜相对介电常数和磁导率的场量分布。(通常认为变换后磁导率 $\mu_r = 1$ 可以忽略)由图可知,球型龙伯透镜经过坐标变换后,相对介电常数在 xx、yy 方向有明显变化,在 zz, yz 方向变化不明显,从剖面图可以看出中间范围相对介电常数大,边缘方向逐渐减小。

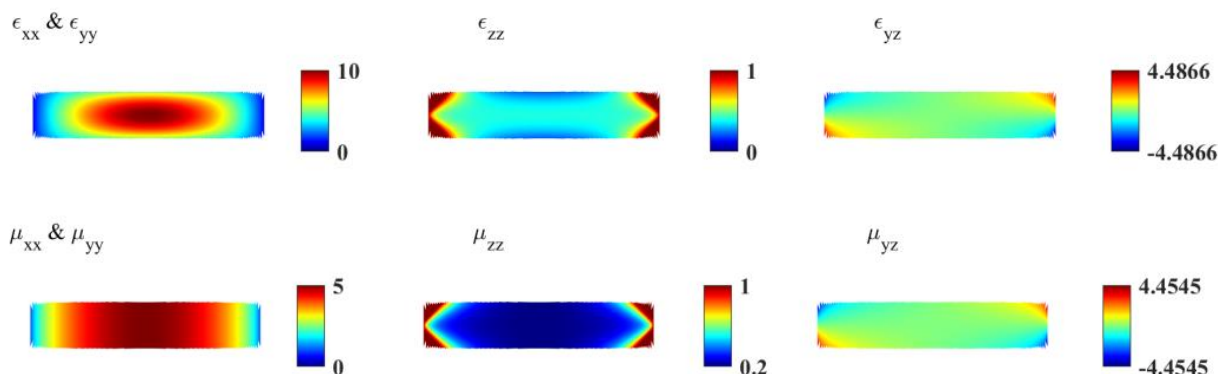


图 2-20 通过编程得到的平面化介电常数强度图

利用编程后得到的数据表,对比原球形龙伯透镜每层球壳的半径平均值(为内径、为外径)：

$$r_{\text{平}} = \frac{r_{\text{内}} + r_{\text{外}}}{2}$$

得到平面化龙伯透镜的各层相对介电常数,如下表所示：

球壳平面化序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
xO 方向半径平均值	5	15	23	29	34.5	39	42.5	45.5	48	49.5
相对介电常数	9.9001	9.1101	7.9398	6.7760	5.5144	4.3542	3.3638	2.4271	1.5098	0.5172

表 2-3 平面化龙伯透镜的各层相对介电常数

由于平面龙伯透镜失去球形龙伯透镜原有球对称性,能够使其达到球形龙伯透镜同等汇聚效果的焦点只有一个。我们通过在空气盒子上加载平面波如图 2-21 所示,找到平面波汇聚的焦点如图 2-23 所示,该焦点位置就是平面龙伯透镜的馈源放置位置,如图 2-24 所示。

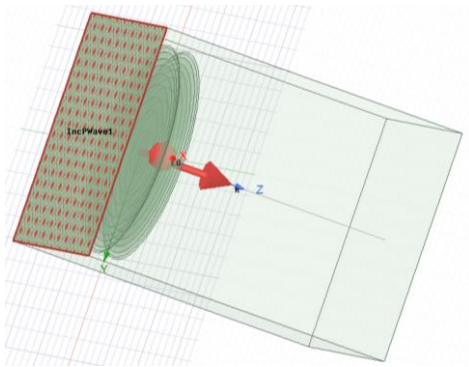


图 2-21 寻找球形龙伯透镜焦点

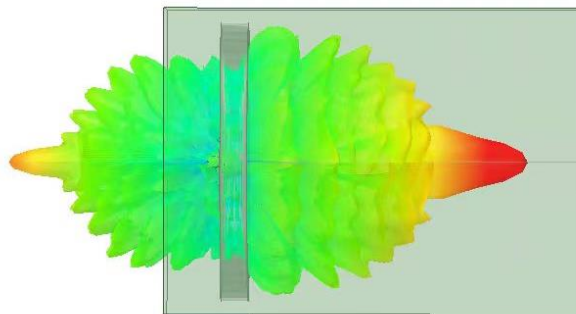


图 2-22 平面波射入平面龙伯透镜 3D 辐射

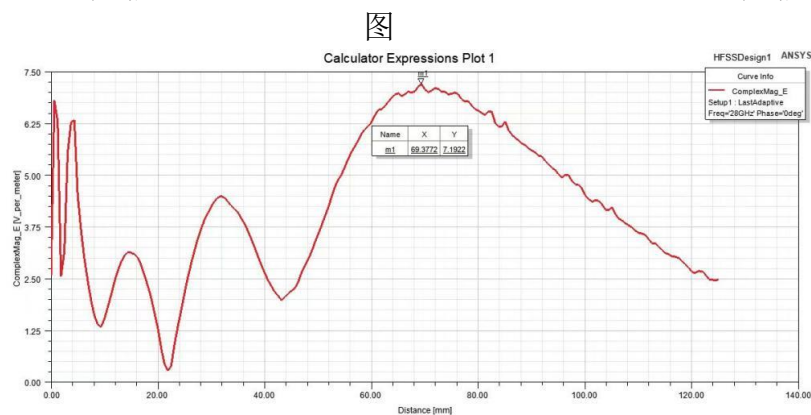


图 2-23 焦点位置距平面龙伯透镜约为 69mm

找到焦点后，将矩形波导加载至焦点处，分析平面龙伯透镜的增益情况。

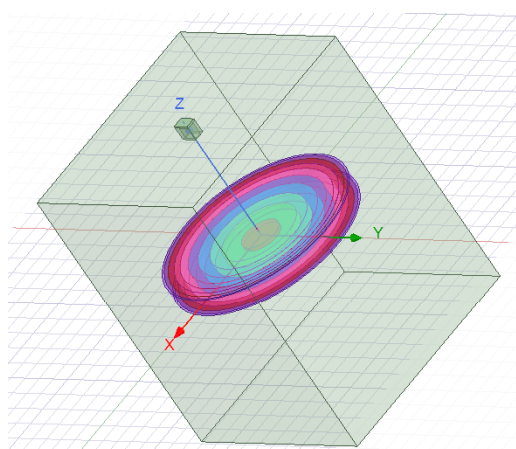
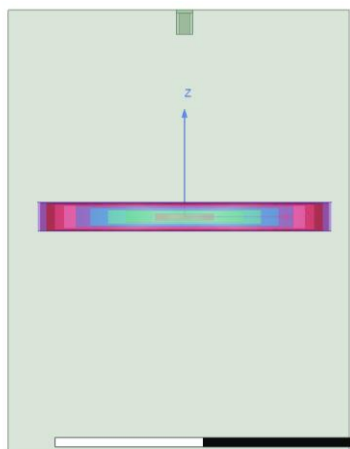


图 2-24 加载波导后的平面龙伯透镜

如图 2-25 所示，平面龙伯透镜最大增益为 17.8dBi，严重低于球型龙伯透镜，且副瓣情况严重，分析原因可能是仿真软件精度不够，后续利用脚本软件将平面透镜细化，得到图 2-26 所示平面龙伯透镜。

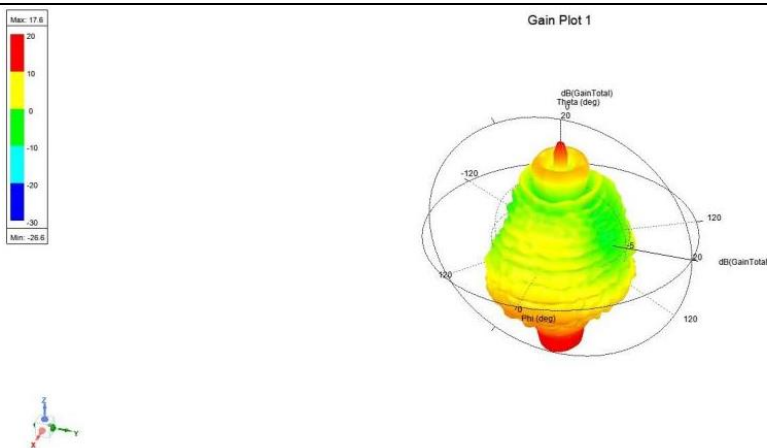


图 2-25 平面龙伯透镜增益情况

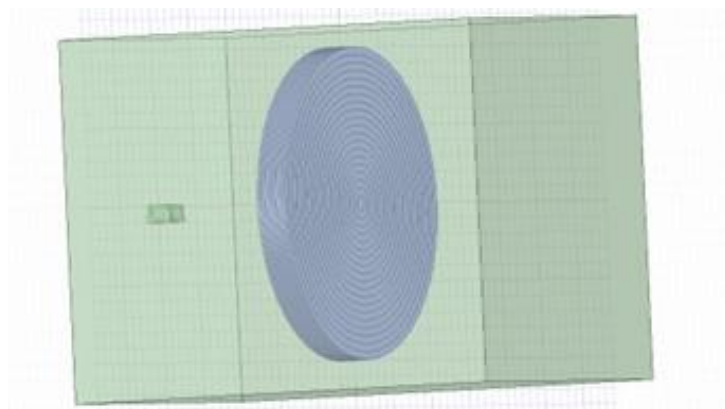


图 2-26 经过脚本文件细化后的平面龙伯透镜

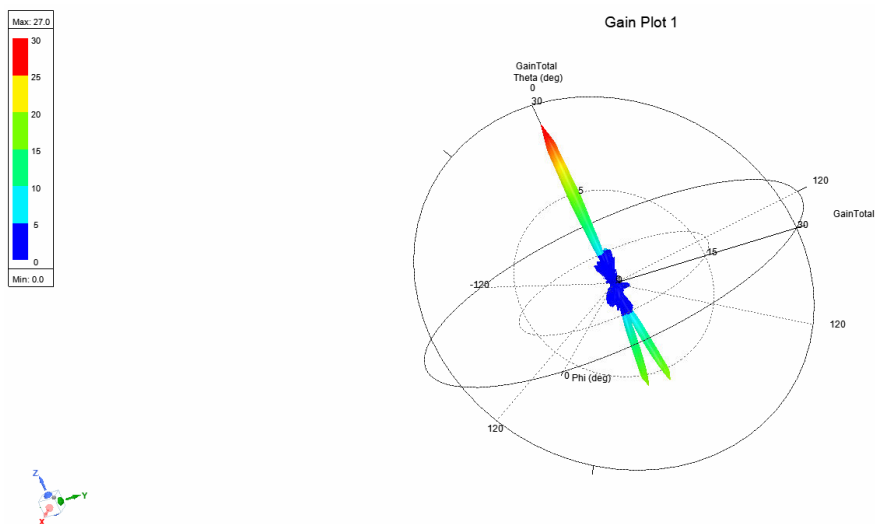


图 2-27 细化后的平面龙伯透镜增益情况

由图 2-27 可得，平面龙伯透镜最终增益为 27dBi，且无明显副瓣。

而后我们考虑将平面龙伯透镜单元化。我们选用的陶瓷片材料的介电常数为 9.9，采用的小单元结构为长方体打孔单元，将平面龙伯透镜用长为 3mm，宽为 2mm，高为 10mm 的打孔长方体小单元进行替换，打孔的长方体长为 a ，宽为 b ，高为 10。通过调整中间方形孔的边长，可以实现在单元中空气和陶瓷占比的调控，从而实现等效介电常数的有效调节。

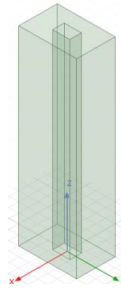


图 2-28 所提出的单元：长方体打孔单元

通过介质空气比，得到小单元理想介电常数 (ϵ) 同打孔的长方体长 (a)，宽 (b) 的关系式：

$$9.9 - \frac{8.9ab}{6} = \epsilon$$

从而可得到表 2-4。

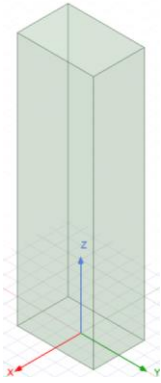
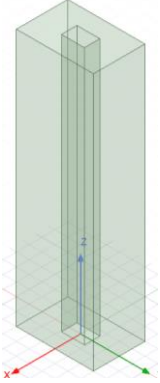
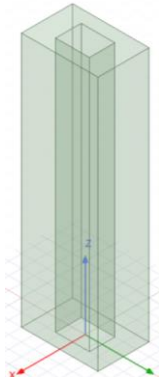
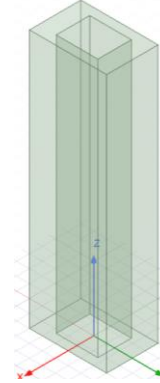

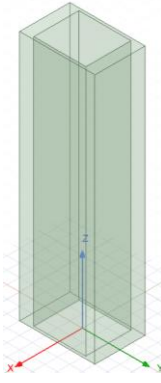

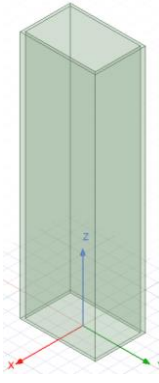
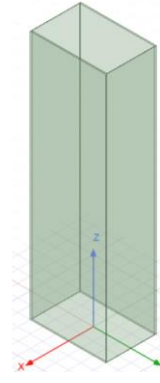

序号	1	2	3	4	5
小单元模型					
a/mm	0	0.6000	1.0000	1.3000	1.5000
b/mm	0	0.8876	1.3215	1.6200	1.9711
介电常数 ϵ	9.9001	9.1101	7.9398	6.7760	5.5144
序号	6	7	8	9	10
小单元模型					
a/mm	1.8000	1.8000	1.8000	1.9000	1.9950
b/mm	2.0771	2.4480	2.7989	2.9770	2.9989
介电常数 ϵ	4.3542	3.3638	2.4271	1.5098	1.0257

表 2-4 平面龙伯透镜等效替换小单元的尺寸

2.3 球形龙伯透镜与平面龙伯透镜的对比

由图 2-27 可得平面龙伯透镜的最大增益为 27dBi, 由图 2-11 可得球形龙伯透镜的增益情况为 27.9dBi。可见平面化龙伯透镜依旧能够保持较高增益, 且平面龙伯透镜幅瓣明显减少。总而言之, 从球形到平面, 龙伯透镜的增益并未受到大幅度影响, 但失去了波束相位调控功能, 为了补偿这一功能, 后续我们将继续在平面龙伯透镜上加载超表面, 利用切面单元的相位梯度来实现波束的偏转。平面龙伯透镜有着体量小, 着地面积大等特点, 在日常通信中有很大的利用价值, 对其增益特点的研究也是有着显著意义。

第三章 平面龙伯透镜的相位梯度超表面及波束偏转

3.1 平面龙伯透镜的相位梯度超表面的研究

3.1.1 相位梯度超表面原理

相位梯度超表面是一种具有亚波长厚度的各向异性结构，能够使入射到其表面的电磁波发射相位突变，并在表面方向上产生相位梯度。相位梯度超表面的基本工作机理是，相位梯度超表面根据特别设定的单元结构的排列实现相位梯度分布，就可以改变整体相位从而控制电磁波的传播方向和传播形式。

在电磁波的入射角度维持不变的情况下，改变界面处的相位梯度超表面，从而改变相位突变值，在界面上透射或反射电磁波的角度就会产生一定的改变，这种现象称为奇异偏转。在相位梯度超表面设计过程中重点在于控制单元结构的相位和幅度，所以在设计过程中必须确保单元结构的幅值尽量大，并且单元结构的相位覆盖尽量达到 360° ，使得相应的相位分布达到某些物理特性的需要。

3.1.2 模型设计过程

(1) 相位梯度超表面设计过程

为了实现宽带、高效、低损耗的平面龙伯透镜，需要选择合适的单元结构和尺寸。一般来说，单元结构应该具有以下特点：一是能够提供足够大的相位范围（至少 $0\sim 360^\circ$ ）；二是能够抑制极化旋转和交叉极化。目前已有多种类型的单元结构被用于设计平面龙伯透镜，例如金属贴片、金属环、金属螺旋线圈、介质棒等。其中，金属贴片结构是一种常用的单元结构，其优点是结构简单、相位范围大、反射效率高、极化旋转和交叉极化小。

通过阅读相关文献和进行信息检索后，我们决定参照前序项目中设计的一种金属贴片结构——十字打孔单元来进行研究。

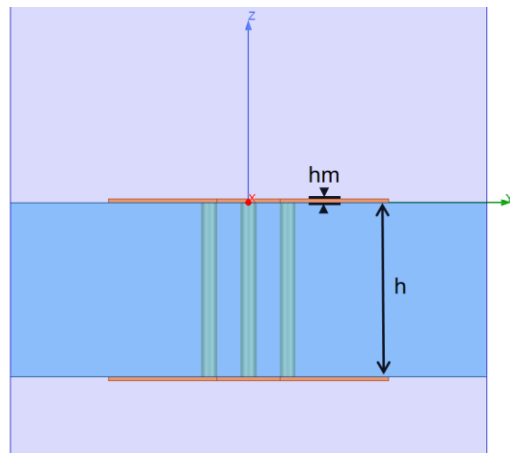
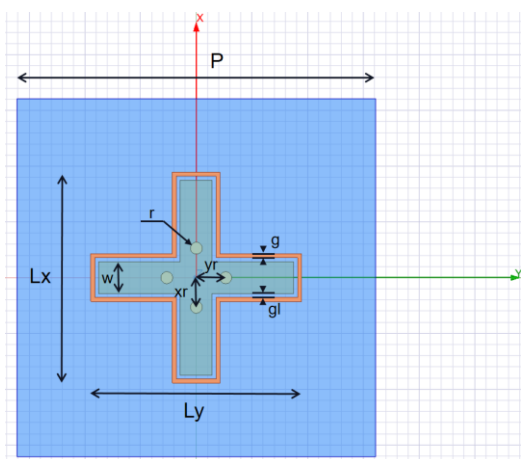


图 3-1 所建立的金属贴片结构单元（左：俯视图，右：侧视图）

图 3-1 给出了超表面单元结构示意图，整个单元由三层材料组成，最上层有四个孔的十字形镂空金属结构，厚度 $h_m=0.05\text{mm}$ ，长度为自变量 L_x ，宽度为自变量 L_y ，中间介质层为“Rogers RT/duroid 5880 高频板” ($\epsilon_r=2.2$)，厚度为 $h=2.36\text{mm}$ ，底层为相同的十字形镂空金属结构，上层和下层的四个孔由四根圆柱体连接。同时，过孔的位置与 L_x 和 L_y 有关，其中 $x_r=a*L_x$ 和 $y_r=a*L_y$ ，其中“ a ”是常数，等于 0.14。单位晶胞的相移是通过改变交叉偶极子的长度从 3.2 毫米至 8.2 毫米，分辨率为 0.1 毫米。单元的其他参数元件有： $w=0.8\text{ mm}$ ， $gl=0.1\text{ mm}$ ， $g=0.1\text{mm}$ ，和 $R=0.15\text{mm}$ 。

为了实现极化分集，我们将结构几何参数 w ， gl ， g ， r 固定，通过不断改变 L_x ， L_y 的值来调节电磁波的透射相位。我们调节相位时，先是通过扫描参数大概确定了不同 L_x 尺寸所对应的相位，再根据相位数据表格选择合适的相位梯度值，我们这里选择的是 80 度，然后再细化尺寸数据，找到误差不超过 5 的对应九个相对移相值，此处选择九个相对移相值是为了使贴片单元的相位覆盖 0~360 度，这是实现宽带、高效、低损耗的平面龙伯透镜的必要条件。

通过不断通过仿真优化，我们最终采用了 9 种十字形结构，设计了一种 10×11 的超表面，其单元结构几何参数表 3-1 所示。通过一定的排列方式排列后的相位梯度超表面如图 3-2 所示，其中 y 方向的每一列单元均为同种单元。

单元编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L_x	3.6	5.65	6.1	6.6	8.2	5	5.93	6.3	7
S21 相位	-73.4	-151.7	128.4	46.5	-35.9	-113.1	167.6	89.8	9.6
相对移相值	0	-80	-160	-240	-320	-40	-120	-200	-280

表 3-1 九种十字单元结构几何参数

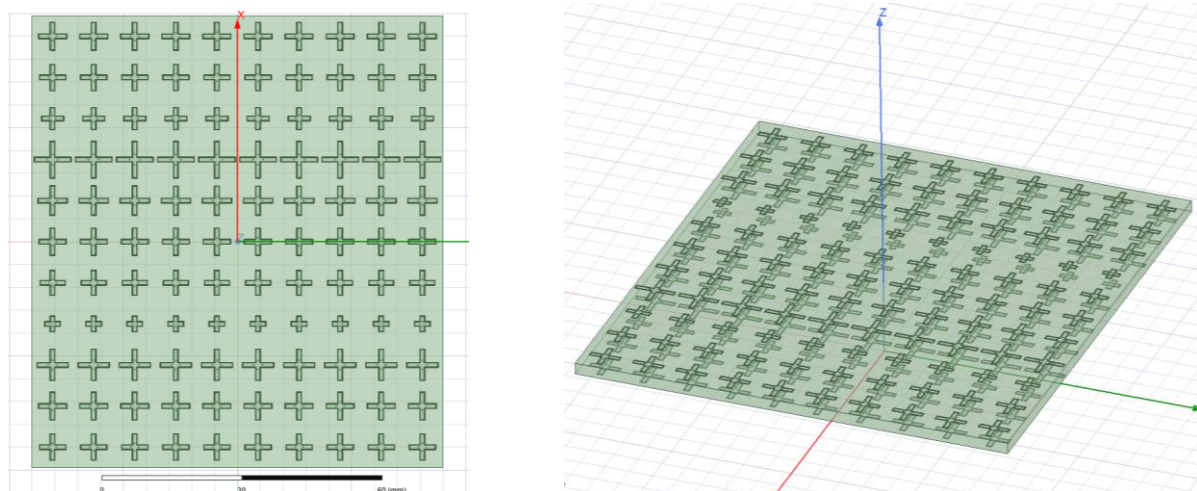


图 3-2 单元结构二维排列组成超表面后的结构示意图（左：二维，右：三维）

（2）相位梯度超表面加载在平面龙伯透镜上进行仿真

设计完相位梯度超表面，我们开始把超表面加在前面设计好的平面龙伯透镜上进行结合仿真，从而实现波束偏转。具体结构如图 3-3，分别是相位梯度超表面实现波束偏转结构图的三维示意图、侧视图、俯视图。

图中，相位梯度超表面平行放置于距离平面龙伯透镜出射波方向 2mm 处，矩形波导放在上述论文所提到的焦点处，三者均以 z 轴为中心。

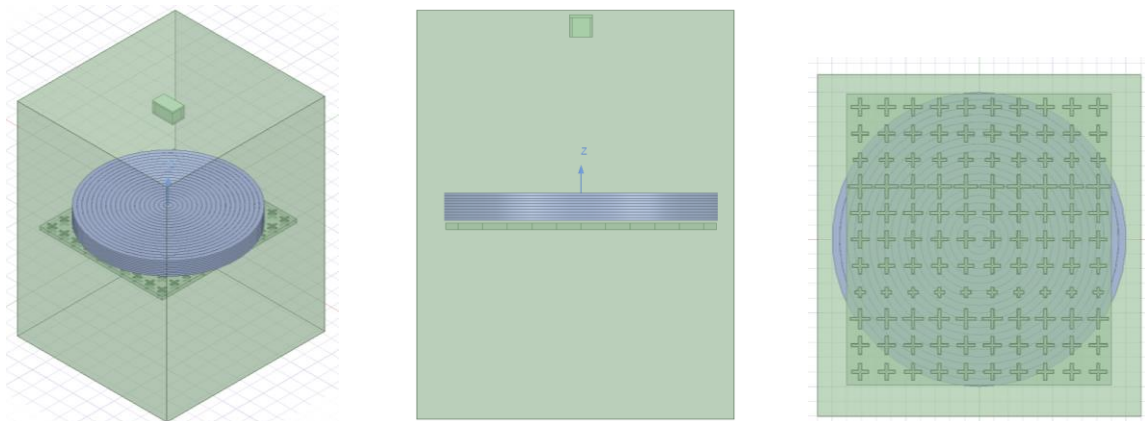


图 3-3 相位梯度超表面实现波束偏转的仿真结构示意图(左：三维，中：侧视图，右俯视图)

3.1.3 仿真结果分析

根据上述相位梯度超表面加载平面龙伯透镜实现波束偏转的模型，在 HFSS 软件上，我们仿真得到了较为理想的结果，如图 3-5。由方向图我们可以看出，该相位梯度超表面使波束发生了 20 度的偏转，且增益大小 15.7227dB，达到了预期成果。由此我们可以验证，由小贴片单元二维排列组成的相位梯度超表面可以使平面龙伯透镜实现波束偏转，从而实现了采用超表面加载技术提升龙伯透镜出射波束的调控能力。

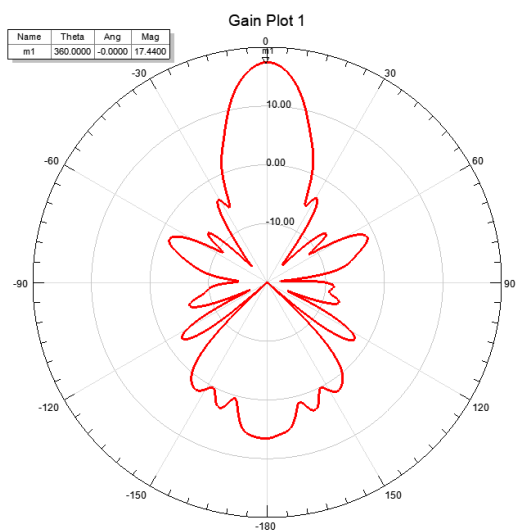


图 3-4 偏转前的方向图及增益

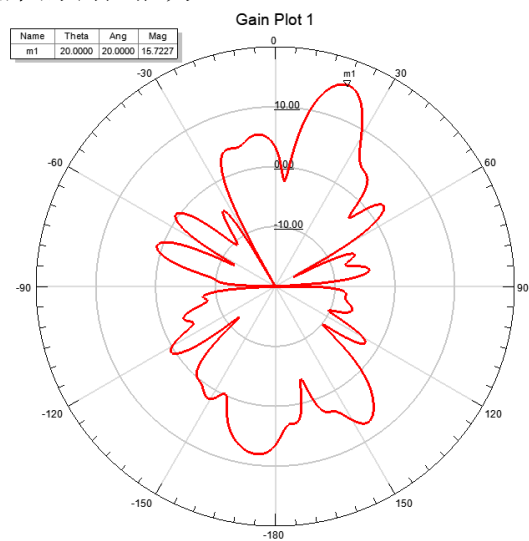


图 3-5 相位梯度超表面实现波束偏转的方向图及增益

结论

建立了球形龙伯透镜和平面龙伯透镜，分析了平面化对增益性能的影响。设计了超表面加载至平面龙伯透镜，使平面龙伯透镜实现波束偏转控制。

我们的成果主要分为两个部分，第一是完成了球形龙伯透镜的平面化，第二是在平面龙伯透镜上加载超表面并实现了波束偏转。

我们的项目具有一定的特色和创新点，具体在于：在球形龙伯透镜平面化的时候，一般情况下平面龙伯透镜不再具有球形龙伯透镜的旋转对称特性，即不能做到馈源天线放在球的表面上的任何一点时，与之对应的一侧都会有波束出射。那我们如果想做到平面龙伯透镜的波束偏转，第一种方法是与平面龙伯透镜表面平行地移动馈源，但是此时波束偏转会恶化，具体表现在增益下降、波束展宽，甚至可能会出现一些负瓣，产生很大的损失。因此我们采用加载相位梯度超表面实现波束偏转的方法，此时即不会出现刚才所说的损失，因为此时只改变了出射平面波的相位分布，也就是把出射相位平面变成斜面，因为所用能量不变，所以理论上增益不会有损失，这是我们的预期结果，并且已通过实验验证成功。

总之，我们在平面化减小龙伯透镜体积的同时，实现了一定角度范围内的波束偏转，同时增益并没有下降很多，这是我们做到的创新点与特色。

参考文献

- [1] 车鑫,高巨. 高增益平面龙伯透镜研究[C]//中国电子学会.2022 年全国微波毫米波会议论文集(上册).[出版者不详],2022:4.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.035960.
- [2] 郑依璇,郑少勇,潘咏梅等. 基于 3D 打印的新型宽角扫描平面龙伯透镜天线[C]//中国电子学会.2021 年全国天线年会论文集.西安交通大学出版社(XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS),2021:4.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.067656.
- [3] 臧雅丹,朱永忠,宋晓鸥等.龙伯透镜天线的原理及其研究进展[J].电讯技术,2021,61(11):1459-1466.
- [4] 刘坤宁. 宽角扫描多波束透镜天线理论与关键技术研究[D].电子科技大学,2021.DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2021.000222.
- [5] 黄明. 多波束透镜天线理论与应用技术研究[D].电子科技大学,2014.
- [6] R. Xu and Z. N. Chen, "Note on Transformation-Optics-Based Flat Metamaterial Luneburg Lens Antenna with Zero-Focal Plane," 2022 International Workshop on Antenna Technology (IWAT), Dublin, Ireland, 2022, pp. 286-288, doi:10.1109/iWAT54881.2022.9810998.
- [7] 王愚.壳层式尤伯透镜[J].无线电工程,1980(04):68-77.
- [8] A.M.史密斯,陆彪.龙伯透镜的设计和应用[J].国外舰船技术.雷达与对抗类,1981(07):8-11.DOI:10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.1981.07.004.
- [9] 华丽娜. 基于相位梯度超表面的多模式天线研究[D].华中师范大学,2023.DOI:10.27159/d.cnki.ghzsu.2022.001838.
- [10] 吴先喜. 基于相位梯度超表面的平面阵列天线的研究[D].桂林电子科技大学,2023.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2022.001050.
- [11] 车文荃,杨琬琛,谷礼政等.基于超表面的天线多波束偏转技术研究[J].微波学报,2022,38(05):7-14.DOI:10.14183/j.cnki.1005-6122.202205002.
- [12] 贾时雨. 基于超表面的波束偏转与极化转换研究[D].西安电子科技大学,2022.DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2021.001524.
- [13] 华丽娜. 基于相位梯度超表面的多模式天线研究[D].华中师范大学,2023.DOI:10.27159/d.cnki.ghzsu.2022.001838.[1]吴先喜. 基于相位梯度超表面的平面阵列天线的研究[D].桂林电子科技大学,2023.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2022.001050.
- [14] 郭文龙,王光明,李海鹏等.超宽带相位梯度超表面设计[J].微波学报,2016,32(03):51-54+59.DOI:10.14183/j.cnki.1005-6122.201603012.

附录

项目成果简介

我们的成果主要分为两个部分，第一是完成了球形龙伯透镜的平面化，第二是在平面龙伯透镜上加载超表面并实现了波束偏转。

我们的项目具有一定的特色和创新点，具体在于：在球形龙伯透镜平面化的时候，一般情况下平面龙伯透镜不再具有球形龙伯透镜的旋转对称特性，即不能做到馈源天线放在球的表面上的任何一点时，与之对应的一侧都会有波束出射。那我们如果想做到平面龙伯透镜的波束偏转，第一种方法是与平面龙伯透镜表面平行地移动馈源，但是此时波束偏转会恶化，具体表现在增益下降、波束展宽，甚至可能会出现一些负瓣，产生很大的损失。因此我们采用加载相位梯度超表面实现波束偏转的方法，此时即不会出现刚才所说的损失，因为此时只改变了出射平面波的相位分布，也就是把出射相位平面变成斜面，因为所用能量不变，所以理论上增益不会有损失，这是我们的预期结果，并且已通过实验验证成功。

总之，我们在平面化减小龙伯透镜体积的同时，实现了一定角度范围内的波束偏转，同时增益并没有下降很多，这是我们做到的创新点与特色。

一、球形龙伯透镜与平面龙伯透镜

1. 球形龙伯透镜原理及设计

我国较早提出龙伯透镜及其原理设计的是 1980 年的《壳层式龙伯透镜》，随着此领域的发展和越来越多的关注，相关文献也更加丰富且深入，下面简述球形龙伯透镜的原理及特点。龙伯透镜天线是一种折射率分层渐变的透镜天线,可将特定频率的入射波汇聚到透镜表面的某点或将电磁波沿原方向反射，能够实现波束扫描和多波束聚焦[1]，理想龙伯透镜的折射率是随着半径连续变化的，然而,自然界中不存在具有连续渐变折射率的材料，因此制备梯度折射率分布的龙伯透镜天线成为主流，通过分层或打孔可以实现梯度折射率分布[2]。

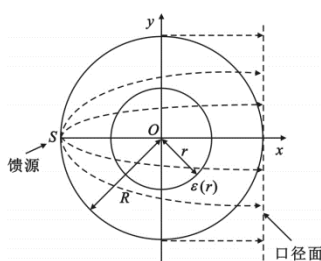


图 1 理想龙伯透镜光程图

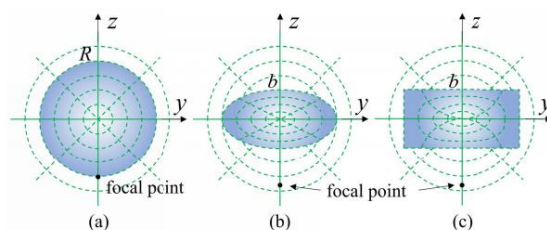


图 2 三种变换后的透镜天线[6]

2. 基于变换光学理论的的变形龙伯透镜

由于传统的球形龙伯透镜因体积庞大、口径效率偏低的缺点在工程中应用时有一定的局限性，也不满足小型化、低剖面、高集成度等要求[3]。基于变换光学理论[3-5]的压缩龙伯透镜[4-5]既保留了传统的球形龙伯透镜的功能，又可以在入射波方向上将其尺寸大幅度压缩，具有极高的可应用性。

变换光学理论也随着电磁理论的发展应运而生，目前有坐标变换理论、保角变换理论和准保角变换理论。球形透镜在此基础上演变为多方面更加优化的变形透镜，分别是椭圆透镜天线、半球透镜天线和平面透镜天线，如图 2。三种变形透镜分别用到不同的光学变换公式，具有不同的功能特点，具体如下表 1。

类型	工作频率/GHz	增益/dBi	旁瓣电平/dB	波束扫描宽度/(°)	天线尺寸	馈源天线	极化方式
球形	94/120	34.69	-15.99		$R = 50 \text{ mm}$	3 元圆锥喇叭天线	垂直极化
球形	30	22	-15.7	± 55	$R = 60\lambda$	开放波导	垂直极化
球形	45	20.5	-16.9	± 54	$R = 81.7\lambda$	16 元隔板喇叭天线	圆极化
椭圆	10	17.2	< -15	± 40	$1.59\lambda \times 0.23\lambda$	微带贴片天线	垂直极化
椭圆	2.25	15.5	-8	± 68	$1.2\lambda \times 0.66\lambda$	8 元微带贴片天线	垂直极化
半球	12.75/20.6	36.75/40.45			$R = 700 \text{ mm}$	双频同轴喇叭天线	圆极化
半球	20/30					介质杆天线	线极化/圆极化
平面	4	12	-16.9	± 60	$2\pi \times 4.4\lambda \times 0.55\lambda$	10 元微带贴片天线	垂直极化
平面	30	30.8	-20	± 80	$2\pi \times 50\lambda \times 6.58\lambda$	21 元微带缝隙天线	垂直极化
平面	28	14.1		± 50	$1.05\lambda \times 0.63\lambda \times 0.065\lambda$	15 元微带相控阵天线	垂直极化

表 1 龙伯透镜天线性能对比[3]

3. 平面透镜天线原理及设计和举例

根据变换光学理论，变换后的坐标可通过图 3 公式来描述；新的介电常数和磁导率的张量值可以用图 4 公式来表示[1]。

$$\begin{cases} y = y' \\ z = \frac{R_0 - b}{R_0 - R} \left(z' - \sqrt{R^2 - y'^2} \right) + \frac{b}{R} \sqrt{R^2 - y'^2} \end{cases}$$

图 3 平面龙伯透镜坐标变换公式[6]

$$\begin{aligned} \bar{\bar{\epsilon}} &= \epsilon_r(y, z) \times \begin{bmatrix} R/b & 0 & 0 \\ 0 & R/b & 0 \\ 0 & 0 & b/R \end{bmatrix} \text{ and} \\ \bar{\bar{\mu}} &= \begin{bmatrix} R/b & 0 & 0 \\ 0 & R/b & 0 \\ 0 & 0 & b/R \end{bmatrix} \end{aligned}$$

图 4 变换后的介电常数和磁导率值[6]

层数	h(mm)	a(mm)	b(mm)	ϵ
1	2.49	39	14	13
2	4.98	66.5	41.5	11
3	6.6	87.15	62.15	9
4	8.25	95.65	70.65	7
5	9.3	111.4	86.4	5
6	10.35	119.25	94.25	3

表 2 平面龙伯透镜尺寸参数[1]

通过软件仿真确定了透镜层数并优化了每层的尺寸。最终得到的平面龙伯透镜的详细参数如表 2 所示。

4. 结论

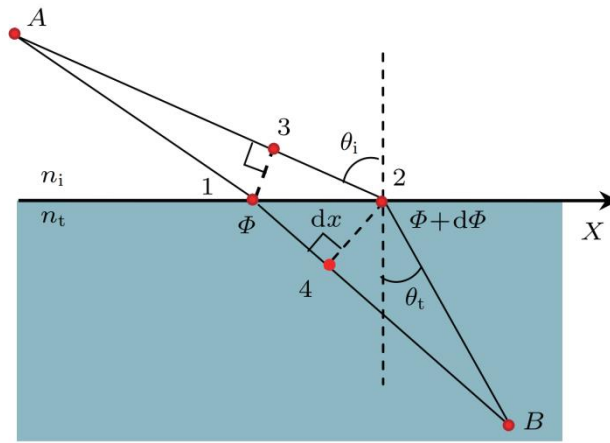
本文结合参考的几篇有关龙伯透镜领域的具有代表性的文献，综述了球形龙伯透镜，基于光学变换的变形龙伯透镜，以及平面化龙伯透镜的原理和结构特点。中间介绍一种由六层介电常数由内到外呈梯度逐渐减小的小圆柱透镜构成的龙伯透镜，是具体化龙伯透镜的体现，也是目前相关学者常用来验证龙伯透镜功能的初步模型之一。

二、平面龙伯透镜的相位梯度超表面及波束偏转

1. 相位梯度超表面

相位梯度超表面是一种特殊类型的超表面，由周期性或准周期性的亚波长结构组成，其设计目的是为了在其表面上产生一个连续的相位梯度。相位梯度超表面的原理是利用亚波长结构单元来调节电磁波在单元上的反射或透射系数，从而改变相位分布。一个由周期性排列的结构单元组成的超表面可以对入射波进行全相位（ $0 \sim 2\pi$ ）延迟调制，从而实现对反射或透射波的方向、相位、幅度和极化等性质的控制。这些结构可以是金属或介电材料，其尺寸和形状都远小于工作波长。由于这些结构的尺寸远小于工作波

长，它们可以被视为电磁响应的局部散射源。通过精确设计这些亚波长结构的几何形状和尺寸，可以实现对电磁波的局部相位和振幅的控制。这种相位梯度可以导致电磁波的折射或反射方向发生偏转。通过调整超表面上的相位梯度，可以实现对电磁波的方向控制。相位梯度超表面的原理是利用亚波长结构单元来调节电磁波在单元上的反射或透射系数，从而改变相位分布。一个由周期性排列的结构单元组成的超表面可以对入射波进行全相位（ $0\sim 2\pi$ ）延迟调制，从而实现对反射或透射波的方向、相位、幅度和极化等性质的控制。



广义 Snell 折射定律示意图

广义 Snell 折射定律：

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda d\phi}{2\pi dx}$$

图? 为广义 Snell 折射定律示意图。其中 θ_i 和 θ_t 分别是入射角和折射角， λ 是工作波长， dx 是点 1 到点 2 的距离， ϕ 和 $d\phi$ 表示两条路径的透射相位， $\frac{d\phi}{dx}$ 表示相位梯度。若选取合适大小的相位梯度，则可在任意方向上实现电磁波的折射。

将平面龙伯透镜和相位梯度超表面结合起来，可以实现对电磁波束的高效宽带调控。例如，通过在平面龙伯透镜的表面覆盖相位梯度超表面，可以实现对反射波束的偏转功能，即将入射波束按照预设的角度反射出去。这种结构可以用于毫米波通信、雷达和成像等领域，具有低损耗、高增益、和高灵活性等优点。

2. 相位补偿原理

相位补偿原理是一种设计超表面的方法，为了实现高效率的波束偏转，超表面单元不仅要引入相应的相位梯度，还要补偿入射光在传播过程中积累的相位差。这样可以保证出射光在目标方向上具有相干性和同相性。为了实现高效率的波束偏转，超表面单元要满足以下条件：

相位变化要与相位梯度一致；

相位变化要与入射光在传播过程中积累的相位差相抵消。

3. 共振原理

当电磁振荡与某个特定频率相遇时，它们会产生共振。这种共振会对电磁振荡产生特定的影响。相对介电常数和磁导率随着频率的变化而变化，并且可能为负。当电磁波的频率比谐振结构的共振频率更小时，其表现为正常的正响应；当电磁波的频率和谐振结构的共振频率一样大小时，结构对电磁波的响应是最大的；如果都不是，则表现为异常的负响应。如果给定一个入射电磁波的频率，改变结构的共振频率，则可任意改变该结构的响应程度。

结构的共振频率：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

其中 L 、 C 分别为结构的等效电感和等效电容，而这两个参数与结构的尺寸参数密切相关。因此，通过合理的改变谐振结构的相关尺寸，就可以得到任意的响应，从而得到任意的电磁特性。通过改变谐振结构的尺寸参数，得到一组相位不连续的谐振结构单元组，相位覆盖 2π 范围，引入了相位梯度进而实现对电磁波的调控。

心得体会

04021714 陈航

一开始，我们的知识和经验仅限于教科书上的理论，但 SRTP 项目让我们真正将理论应用于实践，让我们初探科研的魅力和挑战。

首先，我们进行了广泛的文献阅读，收集并分析了大量的学术文章和研究报告。虽然这些对我们来说颇具难度，但在此过程中，我们逐渐了解了龙伯透镜的基本原理及超表面的广泛应用，这为我们后续的建模提供了指引的方向。

在建模的过程中，我逐渐能熟练使用 MATLAB 和电磁仿真软件 HFSS。看似简单的模型，都可能需要大量的尝试。建模后便是漫长的仿真，面对不尽如人意的结果时，我也锻炼出了良好的心态和尝试解决问题的能力。经过反复修改模型，优化参数后，我们终于得到了仿真结果较好的模型。

感谢张彦老师和季然学长的悉心指导，感谢每位团队成员的坚持与努力！

04021414 郭响

经过一年的项目实施，感觉收获了很多，也有很多需要反思的东西。先说不好的的地方，第一点，小组一开始没有为自己的项目制定详细可行的计划，导致很多时候赶不上变化，事情堆到最后才做，每个人都身心俱疲。第二点，大家都指望着老师能够指导每一步推进，没有自主学习或者说没有想要去精进自己不熟悉的地方。第三点，组内没有进行自评和互评，也没有合理分配任务。多做的人因为最熟悉自己的东西，除了处理自己的问题，还要处理组员的问题。一个人承担了所有，虽然这样也能学习到更多东西，但本来就是给三个人完成的任务，一个人也不可能做完。虽然这不是一次非常完美的小组合作经历，但我认为它是让我决定走向科研路的引路石。非常感谢张彦老师对我们的耐心指导，每次和张彦老师开完组会都让我对我的专业、研究项目有了更深的理解。张彦老师总能一眼看出问题的关键，每次讲解都图文并茂，用通俗易懂的方式让我们对龙伯天线有一个感性认知。并不断引导我们从一个新的角度去思考问题、解决问题。同时还非常感谢季然学长，一直陪伴我们整个项目走到了最后。还要感谢我的组员们，包容我、陪伴我、鼓励我，然后并肩向前走。一年时间说短短，说长长，相逢即是缘分，希望我们以后都能在自己渴望的科研领域发光发热。

04021113 汪书昕

于大二上学期，我加入了张彦老师的 SRTP 课题组。一年来，张彦老师的悉心教导，季然学长的耐心解答，与郭响、陈航两位同学的一起合作一起进步，都让我收获了很多，不仅收获了丰富的科研知识，还收获了面对问题、解决问题、总结问题的能力，以及与同学、老师沟通交流问题的能力。

我们的课题是平面龙伯透镜多波束调控机理和方法研究，刚看到这个课题的时候，我心里是好奇，是害怕：好奇的是龙伯透镜是什么，好像是飞机会用到的很有用的一个东西；害怕的是这样一个看起来高深莫测，离我们所学知识很遥远的科研项目我能做出来吗？这要怎么从头学起呢？但是，张彦老师仿佛一个定海神针，一步步给我们细化过程，每一步的学习都变成一个阶段性练习，从学习电磁仿真软件 HFSS，到用 HFSS 建一个简单的球

形透镜，到把球形透镜拆分成不同介质层的球壳，也就是我所好奇和害怕的龙伯透镜，再到后来，变换后的平面龙伯透镜，相位梯度超表面，实现波束偏转。每一步，都有条不紊地进行着，虽然中间可能会有波折和坎坷，但是整体的进程非常地稳定。在这个过程中，我开始对这个新的领域很迷茫，但是在小组同学的带领学习下，逐渐熟悉了软件的使用，相关的模型建立仿真，再到阅读老师所给文献和去文献检索网站搜索相关的文献来了解相关基础理论和知识，然后结合相关知识使用仿真软件建立要做的模型、扫参寻找想要的值，整合成项目需要的模型，这个过程也是遇到问题，寻找方法，解决问题的过程，让我收获颇丰。

非常感谢张彦老师对我们的悉心教导，张彦老师是一位非常认真负责、专业素养高并且关心学生的老师，张老师会每周开一次例会来跟我们讨论进度，询问我们有没有问题需要讨论，除此以外，当我们遇到困难难以解决的时候，张彦老师会站在我们的角度发现问题并引导我们寻找方法去解决困难，这样不仅让学生更加了解该科研方面的知识，也锻炼了学生的科研思想。同时，我也非常感谢季然学长对我们的帮助，每当我们有问题，学长都会给我们耐心解答相关知识，并给出实际的专业建议，从而帮助我们通过一个个难过的关卡。小组同学的互相帮助，合作进步也是我非常感激的一点，让我感受到了小组合作的重要性， $1+1+1>3$ 的效果，最终一起完成了一个完整的 SRTP 项目。

总之，我觉得这一年的 SRTP 项目非常有意义，不仅是我人生中的第一次科研训练，也锻炼了我的很多能力，让我收获了很多。吸取教训，积极进取，继续在科研的道路上不断进步！