

曲阜师范大学

# 本科生毕业论文（设计）



题    目	_____应用于 5G 通信系统宽带天线的研究_____
姓    名	_____秦小萌_____学号_____2019412002_____
院    系	_____物理工程学院_____
专    业	_____电子信息工程_____
指导教师	_____徐娟_____职称_____副教授_____

2023 年 5 月 9 日

曲阜师范大学教务处制

## 目录

摘要 .....	1
关键词 .....	1
<b>Abstract</b> .....	1
<b>Key words</b> .....	1
引言 .....	1
第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	2
1.2 国内外研究历史和现状 .....	2
1.3 论文的主要工作和章节安排 .....	2
第二章 天线的基本理论 .....	3
2.1 天线的性能指标及要求 .....	3
2.2 磁电偶极子基本原理 .....	3
2.2.1 电偶极子的基本原理 .....	3
2.2.2 磁偶极子的基本原理 .....	5
2.3 小结 .....	6
第三章 微带天线的特性分析 .....	6
3.1 引言 .....	6
3.2 微带天线的结构 .....	7
3.3 微带天线的损耗特性 .....	7
3.4 微带天线的谐振特性 .....	7
第四章 宽带毫米波圆极化天线单元的设计 .....	8
4.1 引言 .....	8
4.2 微带天线单元 .....	9
4.2.1 磁电偶极子天线单元结构 .....	9
4.2.2 天线反射系数的分析 .....	10
4.2.3 天线辐射特性的分析 .....	10
4.3 小结 .....	11
第五章 总结与展望 .....	12
5.1 论文总结 .....	12
5.2 未来工作展望 .....	12
致谢 .....	12
参考文献 .....	13

# 应用于 5G 通信系统宽带天线的研究

电子信息工程专业学生 秦小萌

指导教师 徐娟

**摘要:** 随着通信频段不断地向多标准化和宽频带化发展, 作为无线通信接收与发射装置, 天线的性能对通讯质量有很大的影响。同时, 用户对通信速率的高要求, 也需要更多的频谱资源来支撑, 但是微波段频谱资源也日趋紧张, 出于这个原因, 频谱资源丰富的毫米波段就成为了 5G 通信技术的首选。圆极化天线还具备抗多径干扰的特点, 以及对各种不良气候环境的适应能力, 这种优点也使得圆极化天线对于许多无线设备来说特别具有吸引力。论文针对应用于 5G 通信的宽带天线的研究, 将传统的矩形微带馈电方式改进为 L 型微带线, 根据相关的设计原理, 设计了圆极化毫米波宽带微带天线。分析其反射特性和辐射特性, 不断调整改进以实现最好的性能, 最终实现应用于 5G 通信系统的宽带天线的设计。

**关键词:** 毫米波 圆极化 宽带 微带天线

## Research on Broadband Antennas Applied in 5G Communication System

Student majoring in electronic information engineering Qin Xiaomeng

Tutor Xu Juan

**Abstract:** As the communication band continues to develop towards multiple standardization and broadband, as a wireless communication receiver and launcher, the property of antennas has a significant bearing on the communicative quality. At the same time, higher user requirements for communication rates also require higher spectrum resources to support, and the microwave band spectrum resources are also being increasingly strained, for this reason, the spectrum-rich millimeter wave band is the first choice for 5G communication. Circularly polarized antennas have the capability to withstand multipath interference and adapt to various adverse weather environment. These advantages make circularly polarized antennas very attractive for a multitude of mobile systems. For the study of broadband antennas applied to 5G communication, the conventional rectangular microstrip feed is improved to L-shaped microstrip line, and the circularly polarized millimeter wave broadband microstrip antenna is made according to the relevant design principles. The antenna reflective coefficient and radiative properties are analyzed to continuously adjust and improve to achieve the best performance, and finally realize the design of broadband antenna applied to 5G communication system.

**Key words:** millimeter wave; circularly polarized; broadband; microstrip antenna

引言 电信和移动行业一直在快速发展。各种技术如全球移动通信定位系统、宽带码分多址、高速分组接入和长期演进, 都实现了快速增长。这些先进的移动技术应该聚集了更低的延迟、高通用性、大可靠性、巨大的广播数据、可简单管理和更多的连接等要求。毫米波段具有许多未授权频段可以应用到 5G 通信系统中, 在毫米波更易于达到 5G 通信所需的高速率和大容量<sup>[1]</sup>。微带天线具有小体积、易于集成等优点, 虽然其带宽不是很宽, 但这些优点也是不能被忽视的。其次, 圆极化天线可以抵抗多径干扰, 适应恶劣天气条件<sup>[2]</sup>。本毕业论文正是关于开展宽带毫米波圆极化微带天线的研究与改良, 旨在更好地研究实现 5G 通信的宽带天线。

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

几十年来,无线蜂窝网络的发展一直在快速增长。移动电话和掌上电脑等应用,对高质量的数据通信仍有非常大的需求。

最近,毫米波通信因其超宽频带而被研究。典型的毫米波频率范围从 6GHz 到 100 GHz,其传输所产生的传播损耗是相当大的。所以,其传输范围是有限的。因此,毫米波传输更适合于高数据速率和密集用户场景的小单元。基于上述特性,毫米波通信在未来 5G 网络中有巨大的发展空间。特别是这几年,在用户更加注重设备小型化等问题的情况下,毫米波微带天线凭借结构紧凑、外形薄、重量轻、在极端天气状况下工作受影响相对较小等特征,迅速受到了广泛关注<sup>[3]</sup>。其中,具有圆极化特性的天线具有较强的抵抗外来干扰的能力,易于适应物体,在移动通信中有着巨大的发展潜力<sup>[4]</sup>。基于以上几点可得论文研究目标:设计出高性能的毫米波圆极化天线。

## 1.2 国内外研究历史和现状

现代化导致了技术的进步,除了电动自行车和机动车以及高速互联网之外,所有这些都是由于电子元件的微型化才得以实现的,这些元件现在很容易安装在印刷电路板上。今天,世界依赖于小型化的通信设备和现代通信设备在日常工作中的大量使用。目前,手机、无线局域网(WLANs)、全球定位系统(GPSs)和卫星电话中的无线通信技术的使用已经增加。无线通信的这种进步是由于微波集成电路的快速发展,它可以将电路的所有组件嵌入到同一印刷板上。

一些科学家在这个领域进行了深入的探索,例如通过对材料的选择和对设计进行优化,最终设计出了宽带天线以减小信号损失率,保证 5G 信号的通讯质量,并且可以满足 5G 宽带的需要。许多国家已经许可了可能的频段进行研究和测试,特别是 6GHz 以下的频率范围,频谱供应在全球范围内不断增长,比如中国的 1.3~3.6GHz 和 4.8~5.0GHz,欧洲的 3.4~3.8GHz,以及韩国的 3.4~3.7GHz 等。

5G 的关键技术是毫米波传输。在 2015 年世界无线电通信大会(WRC-15)上,国际电信联盟将 Ka 波段周围的几个频段主要分配给移动服务,其中包括 37~40.5GHz 和 42.5~43.5 GHz,以及额外的位置,即 31.8~33.4GHz 和 40.5~42.5 GHz。通信系统在高频段工作时,其可以使用的频谱资源相当充足,并且可以占用更宽频带连续通信,这与 5G 信道容量、吞吐量的要求相吻合。

随着新材料的不断开发和加工技术的不断完善,毫米波微带线的研制已有一些成果。虽然毫米波微带线已经被开发出来,其中有一些可以工作到 140GHz,但毫米波微带线仍在向一个全新的方向发展。圆极化天线在移动通信中也有很多应用,在过去的 15 年里获得了很多认可和研究。

## 1.3 论文的主要工作和章节安排

第一章是对当前第五代移动技术的特点及其在毫米波中的应用的介绍。随后介绍了毫米波天线、微带天线和圆极化天线的特点,同时介绍文章接下来的安排。

第二章为理论介绍,详细阐述了天线的各种性能指标和要求、对电偶极子、磁偶极子的理论进行了综合概述,为后续进一步设计天线给予了相关理论指导。

第三章介绍了微带天线的基本知识,对微带天线的结构的分析,分别从损耗和谐振方面对其特性进行分析。

第四章提出了一款圆极化宽带毫米波微带天线。给大家介绍了天线单元的架构,并对天线的反射系数和辐射系数进行分析。

第五章对论文的内容以及天线的设计进行总结,将来还可以用什么样的方式对现有的天线进行改进。

## 第二章 天线的基本理论

### 2.1 天线的性能指标及要求

在通信系统中，天线是相当重要的，韦伯斯特词典将其解释为：发射和接受电磁波的金属装置；美国电气和电子工程协会把它定义为：接受和辐射电磁波的一种方式<sup>[5]</sup>。无论是导航、广播还是无线通信领域，它们的进步是由于微波集成电路的快速发展，它可以将电路的所有组件嵌入到同一印刷板上。

天线的主要功能是将从发送端发出的电流转化成无线电波，并向特定的地区传输；也可以把从特定地区传送来的无线电波转化成电流，送入接收器<sup>[6]</sup>。天线有很多种，但所有天线的原理基本相同，下面给出天线的基本性能。

#### (1) 输入阻抗

天线在馈电端口表现出的阻抗，用  $Z_i$  表示，输入阻抗与频率有关。用公式表示：

$$Z_i = \frac{U_i}{I_i} = R_i + jX_i \quad (2-1)$$

$U_i$  为输入端电压值， $I_i$  为输入端电流值。阻抗的实数部分为  $R_i$ ， $R_i = R_r + R_L$ 。

#### (2) 指向性与增益

一些实用的天线，通常在某些方位上可以进行辐射。指向性  $D(\theta, \varphi)$ ，可定义为每单位立体角的总辐射功率。它可以通过以下方式计算：

$$D(\theta, \varphi) = \frac{r^2 \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H^*]}{P_{\text{rad}}/4\pi} = \frac{2\pi r^2 \text{Re}[E \times H^*]}{P_{\text{rad}}} \quad (2-2)$$

天线的增益与指向性相似，但它需要考虑天线的效率  $\eta$ 。因为有些功率会损失。 $G(\theta, \varphi) = \eta * D(\theta, \varphi)$  指向性和增益都是用 dB 来表示<sup>[7]</sup>。

#### (3) 带宽

天线的带宽通常是满足一定的要求频率范围。这个范围一般是  $S_{11} < -10\text{dB}$ 。绝对带宽：频率范围的上边缘和下边缘之差： $f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$ ；相对带宽：该差值与中心频率的比值： $\frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{f_c}$ 。

#### (4) 轴比

极化短轴与极化长轴在极化方向上某一时刻所呈现的比例就是轴比。当天线的轴比越接近 1 时，其圆极化性能就会越优秀。

#### (5) 极化

天线的极化与天线辐射的电场方向有关。天线辐射的电场可用下面的公式表示：

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \vec{\theta} E_\theta(\theta, \varphi) e^{j\Phi_1} + \vec{\varphi} E_\varphi(\theta, \varphi) e^{j\Phi_2} \quad (2-3)$$

只有当总电场有两个正交的分量，这两个分量之间有  $90^\circ$  的相位差时，才能实现圆极化。圆极化具备高度的兼容性和稳定性，能够与各种不同的系统和环境衔接并保持稳定<sup>[8-9]</sup>。

### 2.2 磁电偶极子基本原理

#### 2.2.1 电偶极子的基本原理

电偶极子可以认为是一段短而直的导线，且伴有高频电流流过。如图 2.1，将电流元竖直地放置在原点处，当其半径  $\ll$  导线长度  $\ll$  导线上面的高频电流的波长时，上面的电流被认为在电偶极子的不同位置具有大致相同的振幅和相位<sup>[10]</sup>。

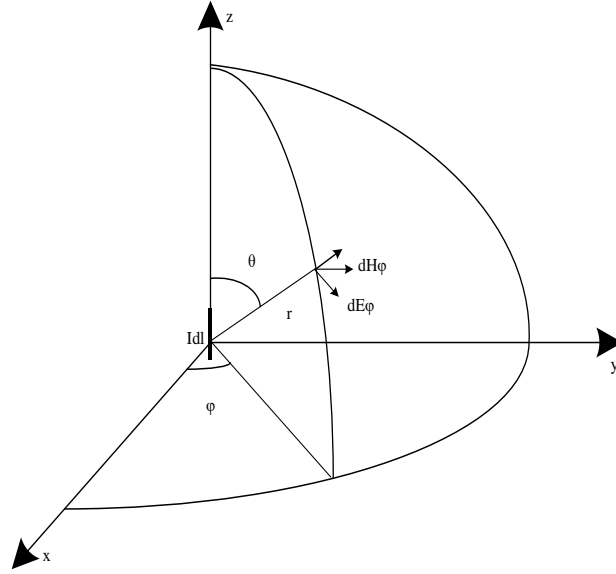


图 2.1 电偶极子示意图

在求它产生的电磁场时，首先要求矢量磁位 $\vec{A}$ ，  
用球坐标分量表示为：

$$A_r = A_z \cos\theta = \frac{Il \cos\theta e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (2-4)$$

$$A_\theta = -A_z \sin\theta = -\frac{Il \sin\theta e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (2-5)$$

$$A_\phi = 0 \quad (2-6)$$

根据 $\vec{A}$ 和 $\vec{B}$ 之间的关系：

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2-7)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (2-8)$$

可以求得磁场强度 $\vec{H}$ 分量：

$$H_\phi = j \frac{kIl \sin\theta}{4\pi r} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{-jkr} \quad (2-9)$$

$$H_r = 0 \quad (2-10)$$

$$H_\theta = 0 \quad (2-11)$$

根据麦克斯韦方程组：

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \vec{H} \quad (2-12)$$

得出 $\vec{E}$ 的表达式为：

$$E_r = \eta \frac{Il \cos\theta}{2\pi r^2} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{-jkr} \quad (2-13)$$

$$E_\theta = j\eta \frac{kIl \sin\theta}{4\pi r} \left(1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{k^2 r^2}\right) e^{-jkr} \quad (2-14)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2-15)$$

$\eta$ 在空气媒介中约为  $120\pi\Omega$ 。

天线主要研究在远场的辐射性能， $kr \gg 1$  得：

$$E_\theta = j\eta \frac{kIl \sin\theta}{4\pi r} e^{-jkr} = j \frac{60\pi Il \sin\theta}{\lambda r} e^{-jkr} \quad (2-16)$$

$$H_\phi = j \frac{kIl \sin\theta}{4\pi r} e^{-jkr} = j \frac{Il \sin\theta}{2\lambda r} e^{-jkr} = \frac{E_\theta}{120\pi} \quad (2-17)$$

$$E_r = E_\varphi = H_r = H_\theta = 0 \quad (2-18)$$

远场区有两个分量 $E_\theta$ 和 $H_\varphi$ ，电场和磁场互相垂直，相位差为 0。可以得到电偶极子在 XOZ 和 YOZ 面上的方向图：

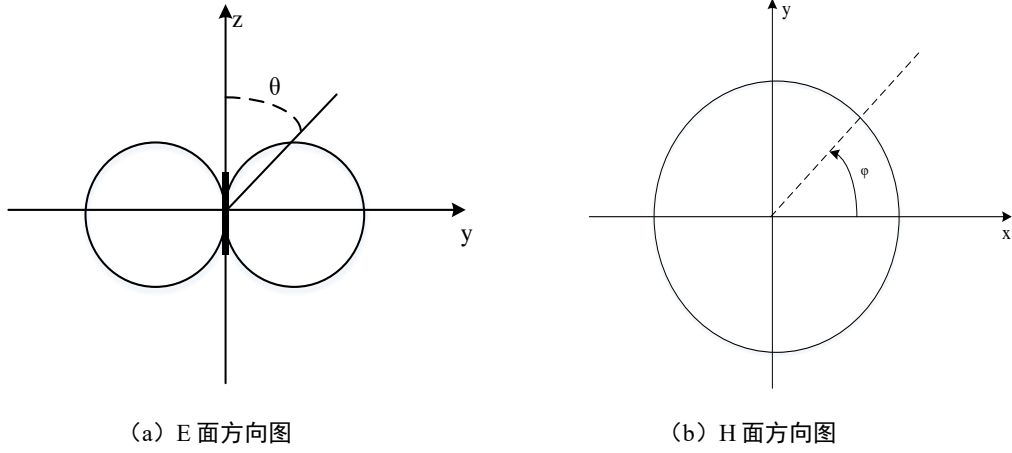


图 2.2 电偶极子电磁场方向图

如图 2.2 所示，E 面方向图为 $\infty$ 形状，H 面为 O 形状。

### 2.2.2 磁偶极子的基本原理

磁偶极子在自然界中并不存在，是人类假想的一种物理模型，将磁偶极子假想为一个极小的圆环，并在上面加载高频电流<sup>[11]</sup>。

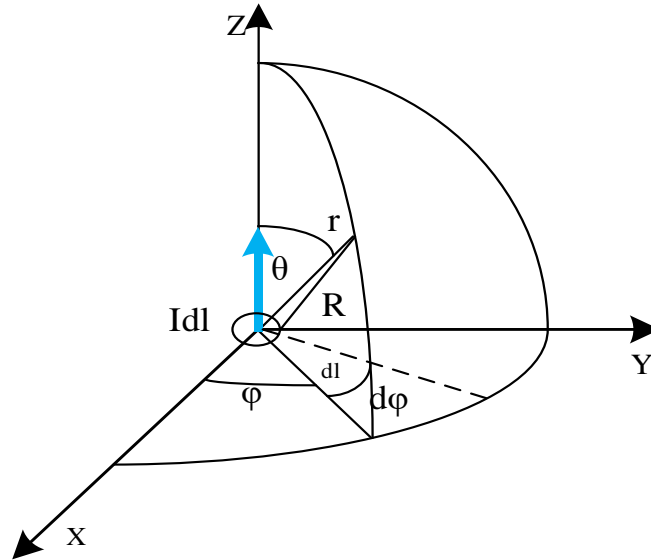


图 2.3 磁偶极子示意图

如图 2.3 所示，载有电流的小圆环放置在 XOY 平面上，当圆环半径远小于规定的测量点到原点的距离时，圆环上每点处的电流大小相同，利用矢量磁位 $\vec{A}$ 亦可得出磁偶极子的 $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 的公式：

$$E_\varphi = -j \frac{k I l \sin \theta}{4 \pi r} \left(1 + \frac{1}{j k r}\right) e^{-j k r} \quad (2-19)$$

$$H_r = \frac{k I l \cos \theta}{2 \pi r^2 \eta} \left(1 + \frac{1}{j k r}\right) e^{-j k r} \quad (2-20)$$

$$H_\theta = j \frac{k I l \sin \theta}{4 \pi r \eta} \left(1 + \frac{1}{j k r} - \frac{1}{k^2 r^2}\right) e^{-j k r} \quad (2-21)$$

$kr \gg 1$ ，远场区的表达式：

$$E_{\varphi} = -j \frac{k l \sin \theta}{4 \pi r} e^{-jkr} = -j \frac{l \sin \theta}{2 \lambda r} e^{-jkr} \quad (2-22)$$

$$H_{\theta} = j \frac{k l \sin \theta}{4 \pi r \eta} e^{-jkr} = j \frac{l \sin \theta}{2 \lambda r \eta} e^{-jkr} = -\frac{E_{\varphi}}{120 \pi} \quad (2-23)$$

假定圆环的面积为：

$$S_0 = \pi a^2 \quad (2-24)$$

化简得：

$$E_{\varphi} = \frac{120 \pi^2 S_0 l \sin \theta}{r \lambda^2} e^{-jkr} \quad (2-25)$$

$$H_{\theta} = -\frac{\pi S_0 l \sin \theta}{r \lambda^2} e^{-jkr} \quad (2-26)$$

磁偶极子的远场辐射方向图，如图 2.4 所示，除 E 面与 H 面互换外，两者方向图形式是一致的。

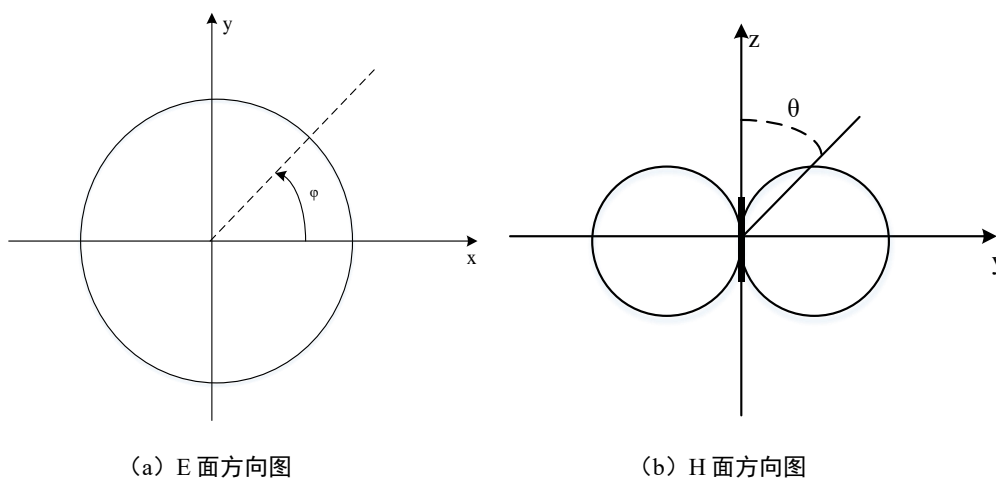


图 2.4 磁偶极子电磁场方向图

### 2.3 小结

本章节一开始介绍了天线的概念和一些基本的指标，其次，对电偶极子、磁偶极子的设计原理作了较为详尽的总结，并给出了相应的计算公式。结果表明：电偶极子与磁偶极子的方向图基本一致，但在 E、H 两个面方向图互换，且具有互补性质，如若将两者按照特定的位置摆放，可实现极宽的带宽。

## 第三章 微带天线的特性分析

### 3.1 引言

时至今日，微带天线已经成为了天线领域一个不容忽视的重要组成部分，其理论解析的手段也在不断地得到发展，很多学者也提出了不同结构和功能的微带天线<sup>[12]</sup>。微带天线是 1955 年获得专利的一种新设计结构。在微带天线中，被称为基材的介电材料被夹在两块导电材料的板之间，下部的导电面和上部的导电板分别称为地平面和贴片。微带天线与印刷电路板的制作过程相似，因此微带天线也被称为印刷天线。微带天线的性能取决于各种参数，如长度、宽度、基底板材料的厚度、介电常数和馈电线的位置。

如今，微带天线已被用于几乎所有的无线通信设备，如移动电话、笔记本电脑、数据卡等<sup>[13]</sup>。这些设备可以在多个频率范围内为各种应用发挥作用。由于在三阶和更高阶的频率下，天线的频带性能会下降，进一步的应用带宽是有限的。因此，未来的需求是更高的带宽，可用于预期的波段应用。



### 3.2 微带天线的结构

微带天线是一个印在接地的电介质衬底上的金属贴片。大多数的微带天线的介质基板比较薄，很容易集成和共形。辐射单元和接地板常选择金属材料，介质基板的材质也各有不同<sup>[14]</sup>。

微带天线可按照辐射单元的不同分类，例如，微带振子天线可以被描述为一种小型的、具有高频率的天线结构。还有一种能够传输无线信号的线性微带天线。微型缝隙型天线是一种小型化的天线结构，其缝隙结构可以实现高频率的电磁辐射和接收。

最常见的微带天线是贴片天线。最常用的形状是矩形，它看起来像截断的微带传输线。这些类型的天线的优点是轮廓小、易保形、重量轻、价格便宜且坚固。如图 3.1 中，便是同轴馈电的微带贴片天线。除此外，还有微带线性天线、微带振子天线和微带缝隙天线等。

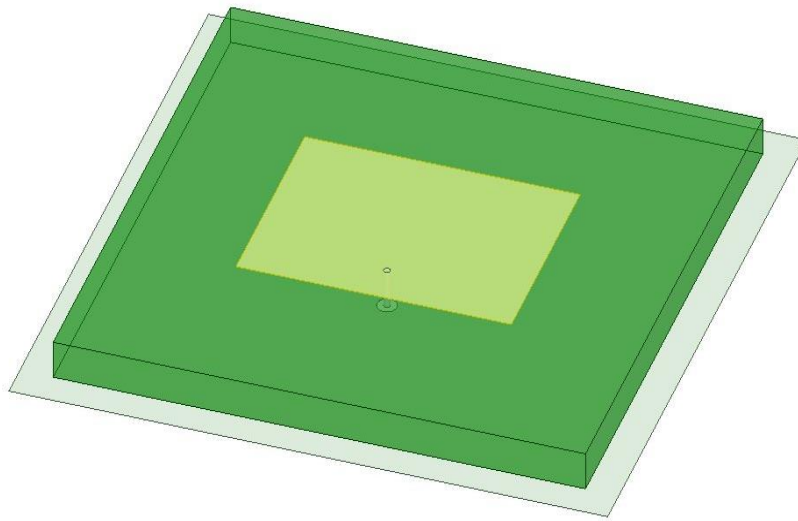


图 3.1 微带贴片天线

### 3.3 微带天线的损耗特性

微带天线的损耗主要包括：辐射损耗、介质损耗和导体损耗。

在实际中，微带电路通常采用金属屏蔽盒进行封装，辐射损耗可以忽略，其整体衰减可以看作是导体耗损与介质耗损的简单叠加。因此，总体衰减可表示为：

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \quad (3-1)$$

其中， $\alpha_c$ 为导体损耗， $\alpha_d$ 为介质损耗。

导体损耗是由于导体非理性而产生的一系列损耗，当一段高频电流流经导带和接地板，但二者并不是由理想材料构成时，就会产生欧姆损耗，与其他结构相比，在微带线中损耗最大。

介质损耗是由于微波导致了介质上的许多分子极化的来回变化，还有晶格的相互摩擦，来回碰撞，产生了热损失而造成的。

### 3.4 微带天线的谐振特性

天线要实现谐振，就必须与馈电系统更好地匹配，例如普通馈电线路的特性阻抗通常在 50 欧姆左右。当馈线处于谐振状态时，可以利用某些阻抗变换与其相匹配。在天线长度约为其一半波长的情况下，通过适当的减小，可使其输入阻抗变为纯电阻，使其实现谐振。实际上，振动体厚度愈大，其谐振缩减所需的长度也愈长。简而言之，谐振点就是输入电抗等于 0 的那个点。

假定在传输时不会有任何损耗，那么天线的特性阻抗，可以用电容 C 和相速  $V_p$  来表示：

$$Z_0 = \frac{1}{V_p C} \quad (3-2)$$

假设该传输线是介电常数为 $\epsilon_r$ 的均一介质材料，那么  $C$  与  $V_p$  的值分别为：

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (3-3)$$

$$V_p = \frac{V_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-4)$$

若传输线有多种介质填充，应该引入有效介电常数 $\epsilon_e$ 则：

$$C = \epsilon_e C_0 \quad (3-5)$$

$$V_p = \frac{V_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (3-6)$$

有效介电常数 $\epsilon_e$ 可简化为：

$$\epsilon_e = \frac{C}{C_0} = \left( \frac{Z'_0}{Z_0} \right)^2 \quad (3-7)$$

其中 $Z_0$ 是实际中测量传输线的特性阻抗， $Z'_0$ 是介质为空气的特性阻抗。

微带天线的特性阻抗 $Z_0$ 为：

$$Z_0 = \frac{Z'_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (3-8)$$

当 $\frac{w}{h} \leq 1$ 时

$$Z'_0 = 60 \ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{h} \right) \quad (3-9)$$

当 $\frac{w}{h} \geq 1$ 时

$$Z'_0 = \frac{120\pi}{\frac{w}{h} + 2.42 - 0.44 \frac{h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6} \quad (3-10)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{10h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3-11)$$

微带天线的特性阻抗，不仅取决于其有效介电常数，而且取决于天线的宽度和厚度，以及介质层厚度<sup>[15]</sup>。

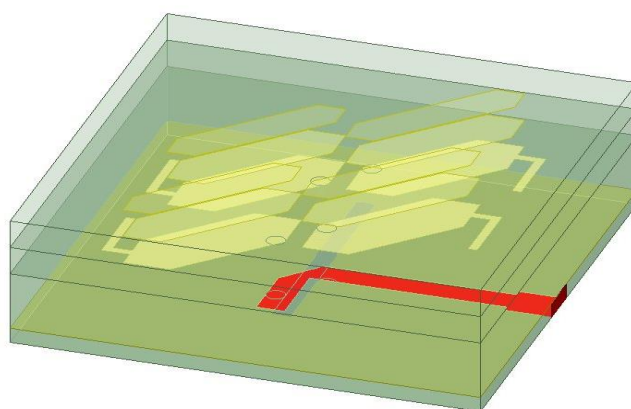
## 第四章 宽带毫米波圆极化天线单元的设计

### 4.1 引言

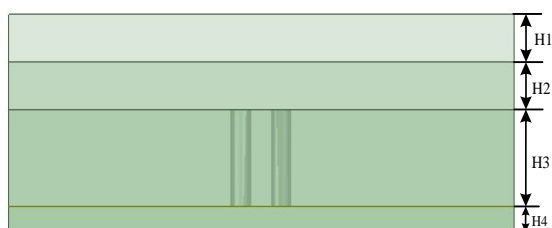
具有极宽带宽的毫米波，可以很好的缓解目前频段拥挤的问题，圆极化波可以抵抗多径反射，信号覆盖能力也很好，有利于 5G 领域通信能力的提升。金属通孔和缝隙可以等效为磁偶极子，矩形贴片等效为电偶极子，这就形成了比较典型的磁偶极子天线。然而，这种类型的天线并非圆极化，需要通过改变其几何形状来达到圆极化，为此，需要在其上添加一个小干扰项，通过对其进行切向加工，才能形成两个正交的模式，产生 90°的相位差。在贴片上增加矩形贴片作为寄生贴片，同样对矩形贴片进行切角处理实现圆极化天线的宽带化；此外，切角处理的矩形金属切片加上 L 形枝节，进一步拓展了带宽。传统上直线形式的馈线效果并不太好，将其改为 L 形馈线，实现阻抗和轴比重合带宽。

## 4.2 微带天线单元

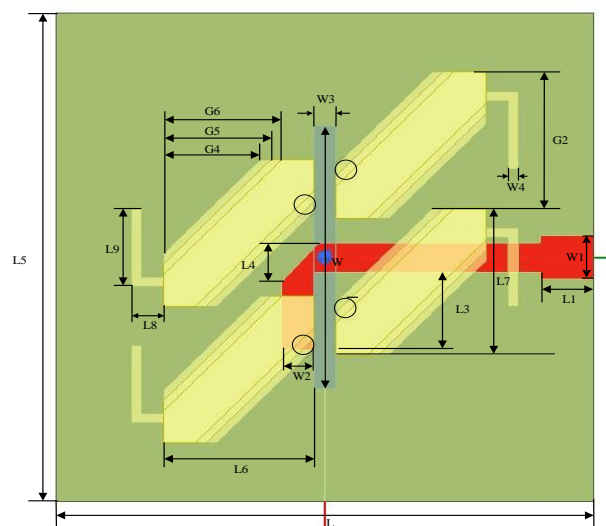
### 4.2.1 磁电偶极子天线单元结构



(a) 整体三维图



(b) 侧面图



(c) 金属贴片与馈电部分

图 4.1 天线结构图

如图 4.1 所示，天线结构有四个介质层，五个金属层。依次是金属层、介质层如此间隔排列。最上面的三个介质层均采用罗杰斯 5880 的材料，第四个介质层所用材料为罗杰斯 4003；金属层由四个完全相同的金属贴片组成，每个金属贴片都进行了切角处理，上一层的切角要比下一层的切角大。第三层的金属贴片上带有 L 形的枝节。四个金属贴片与天线中心对称，第四金属层为地板层，中央蚀刻有矩形缝隙；最底部金属层为微带馈线层，微带线的形状是尾部弯折的直线。第一个和第二个介质层的厚度相同，第三个介质层中有四个金属通孔。

表 4-1 天线结构具体参数 (单位: mm)

H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	W	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>
0.381	0.381	0.787	0.204	5.0	0.45	0.3	0.2	0.1
L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>8</sub>
5.0	0.5	2.1	0.8	0.4	2.7	1.4	1.5	0.3
L <sub>9</sub>	G	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>4</sub>	G <sub>5</sub>	G <sub>6</sub>	
0.8	0.9	0.6	1.4	0.2	0.9	1	1.1	

#### 4.2.2 天线反射系数的分析

图 4.2 显示了天线单元反射系数和增益情况, 天线中心频率为 35GHz, 反射参数 S<sub>11</sub> 曲线的最小值点位于 35GHz 左右, 曲线整体远离-10dB 的临界值, -10dB S<sub>11</sub> 带宽为 30~45GHz, 根据  $\frac{f_{\max}-f_{\min}}{f_c}$  计算得出相对带宽为 26.3%。在此范围内, 天线的增益相对稳定, 没有明显的波动, 总体增益超过 7 dBi。

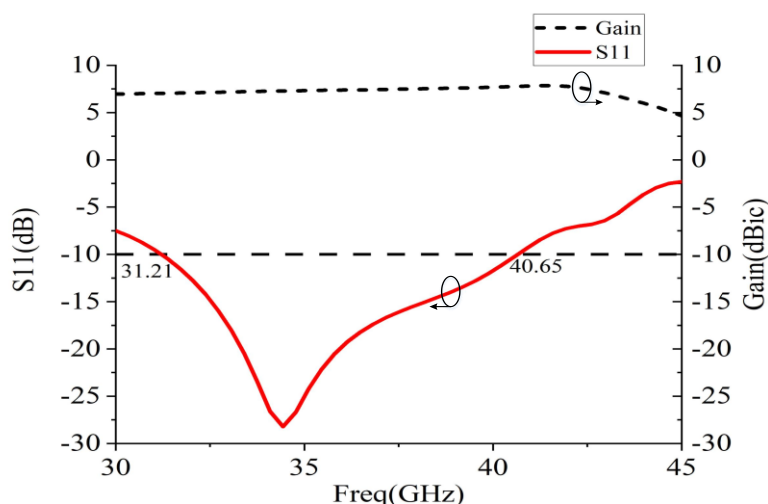


图 4.2 天线 S 参数和增益曲线

#### 4.2.3 天线辐射特性的分析

如图 4.3 所示, 轴比曲线远离 3dB, 实现了较好的圆极化辐射。与 S<sub>11</sub> 曲线一致, 轴比带宽为 32.36~40.98GHz, 相对带宽为 23.5%。

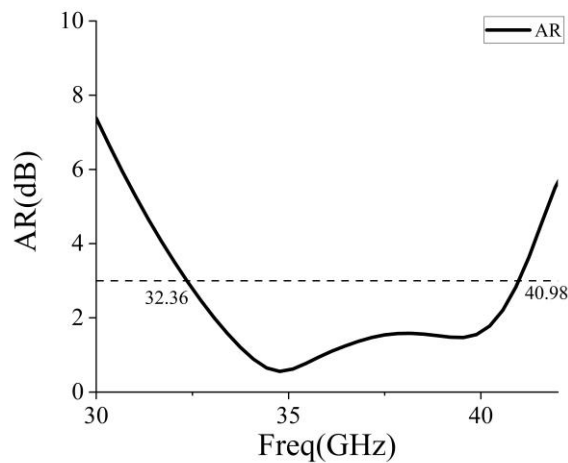


图 4.3 轴比曲线

图 4.4 所示为 35 GHz 频率下，在 XOZ, YOZ 两个平面上，该天线的圆极化图。结果表明：在  $\Phi=0^\circ$  时，左旋圆极化增益可达到 -22.2 dB，右旋圆极化增益可达到 7.3 dB，在  $\Phi=90^\circ$  时，左旋圆极化可达到 -22.4 dB，右旋圆极化可达到 7.3 dB，天线表现出良好的圆极化特性，并且两者相差超过 15 dB，天线辐射右旋圆极化。

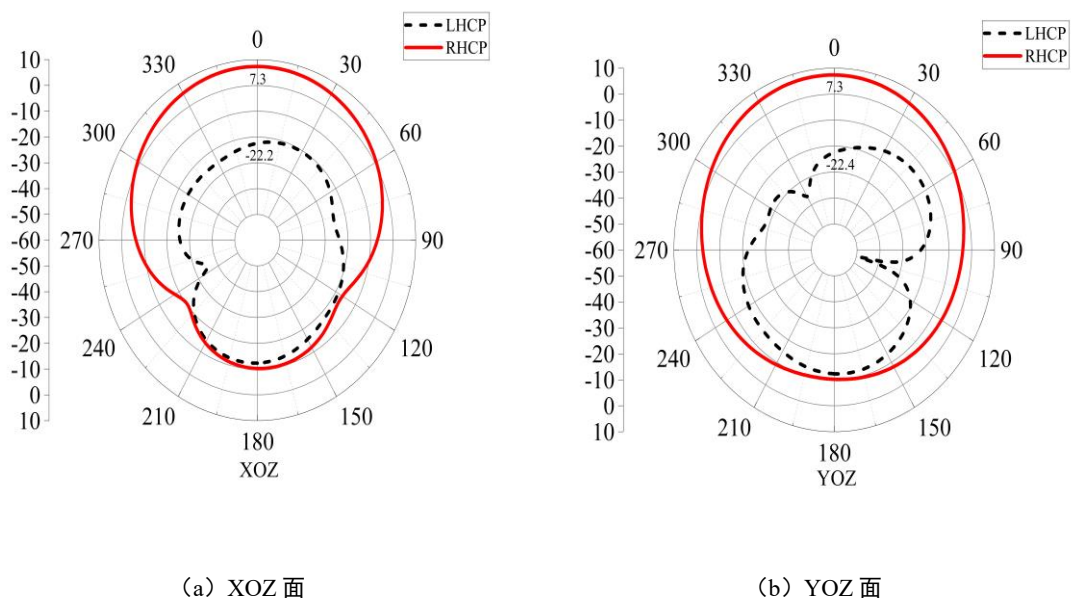


图 4.4 天线归一化方向图

### 4.3 小结

基于前几章的理论，提出了一种采用微带线馈电方式的微带天线。以磁电偶极子的有关理论为基础，设计出了一种宽带毫米波圆极化天线，所获得的天线具有较宽的阻抗带宽，并且在带宽内具有较好的稳定性。

## 第五章 总结与展望

### 5.1 论文总结

论文设计了一款宽带毫米波圆极化天线，天线单元由四个介质层和五个金属层构成，金属层由四个完全相同的金属贴片组成，为实现圆极化天线的宽带化每个金属贴片都进行了切角处理；此外，切角处理的矩形金属切片加上 L 形枝节，进一步拓展了带宽。采用微带线缝隙耦合馈电，充分结合了毫米波和圆极化的优点实现了带宽为 26.3% 的天线设计。

在这次毕业设计中，我学习到了宽带天线以及微带天线的相关理论知识，为天线单元的设计打下了良好的基础；我学会了使用 HFSS 对天线单元进行模型建立和仿真分析，此次设计让我对天线的设计有了更深层次的理解，加深了我对无线通信的相关理论知识的认知，也增强了我学习天线的兴趣。

### 5.2 未来工作展望

以上针对天线单元的设计，在很多地方还需要改进：

(1) 可以通过改变馈电部分来进一步改善天线的有关性能，实现更好的阻抗匹配。如论文的馈电方式，可以考虑采用基片集成波导缝隙耦合馈电，跟微带线馈电相比，在 SIW 中电磁波可以被束缚在封闭的介质导体中，在很大程度上降低表面波损耗。

(2) 天线单元的贴片，用了多层的寄生贴片，对天线的设计来说，相对比较复杂，可以在不降低天线性能的情况下，适当减少天线的层数，简化天线的结构，实现天线小型化。

### 致谢

至此，我的大学生活就要接近尾声，时光如流水，我在曲阜师范大学度过了人生中重要的四年，马上也要开启新征程。首先我想感谢学校这四年的栽培，让我如同一棵小草一样成长，在学校期间，曲师大的学习氛围深深感染了我，让我看到有光的地方就有人读书，让我永远记得萃华园的树和树下认真苦读的人，西联久久不灭的灯，还有春风吹过曲园发出的阵阵歌声。其次我想感谢学院提供给我们良好的环境，让我能在干净整洁的自习室完成自己的学业；我也要感谢各位老师在学习上对我的指导，教我学习，是您们让我懂得知识，收获成长，感谢您们的细心教诲，让我变得更加优秀。我还要感谢大学期间遇到的所有可爱的人们，无论是北门外的门卫大爷还是食堂的打饭阿姨，是你们让我在异地也感受到家的温暖，感谢相遇。再者，我想对我的家人们表达感谢，谢谢一直爱我的张女士和秦先生，谢谢我的舅舅舅妈，从小学就把我带在身边，对我要求严格的同时，也不乏关爱，让我成长为如今的准研究生；在我失意彷徨的时候，你们鼓励我，让我不要怕，勇敢地去面对；我做错了事情的时候，你们也会严厉的批评我，让我认识到自己的错误，并耐心的帮我改正。这让我觉得我真的很幸福，谢谢你们。

我的毕业论文是在徐娟老师和解悦师姐的悉心指导下完成的。徐老师对待学术的严谨的态度对我影响很大，使我明白了应该用怎样的态度对待研究。在撰写论文期间，我不仅认识到做什么事情都需要耐心，还掌握了未来学习生活所必备的研究方法。虽然遇到了很多困难，但是在老师和师姐的耐心的讲解下，困难都得到了顺利地解决。是徐娟老师的耐心帮助让我能够顺利完成此次论文的写作，在这里，对徐娟老师表达衷心的感谢并致以崇高的敬意！

我知道遇到的所有人所有事都会促使我成长，再次向曲师大的所有可爱的人表达感谢和祝福。感恩感谢！

## 参考文献:

- [1] 田洁. 宽带圆极化与多波束毫米波天线阵列研究[D].北京邮电大学,2021.
- [2] 张楠. 宽带圆极化毫米波天线研究[D].西安电子科技大学,2019.
- [3] 周峰,高峰,张武荣,李洪波.移动通信天线技术与工程应用[M].人民邮电出版社,2015.
- [4] Y. Wang, F. Zhu and S. Gao, Design of a Simple Circularly Polarized Antenna for Millimeter-Wave Applications[C].2020 13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), Tianjin, China, 2020, pp. 1-3.
- [5] 陈宽. 几种微带天线的设计与研究[D].电子科技大学,2011.
- [6] 谢处方,饶克瑾.电磁场与电磁波[M].高等教育出版社,1979.
- [7] 林昌禄.天线工程手册[M].电子工业出版社,2002.
- [8] 林昌禄,宋锡明.圆极化天线[M].人民邮电出版社,1986.
- [9] 王玉峰.圆极化天线技术[M].国防工业出版社,2017.
- [10] 魏文元,宫德明,陈必森.天线原理[M].国防教育出版社,1985.
- [11] A. B. Asrokin, A. B. Abas, R. H. B. Basri and N. B. Jamlus, Comparison of base station antenna with  $65^\circ$  and  $105^\circ$  beamwidth[C].2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, China, 2010, pp. 843-846.
- [12] 刘藤. 微带天线的理论研究与工程设计[D].电子科技大学,2011.
- [13] J. R. James, P. S. Hall. C. Wood. Microstrip Antenna Theory and Design[M]. IET Digital Library; IET: 1981-01-01.
- [14] 王昊.微带天线的研究[D].南京理工大学,2008.
- [15] 蓝桥龙. 毫米波微带天线的研究[D].电子科技大学,2006.