

南京信息工程大学

本科生毕业论文(设计)



题 目:

两个用于宽带圆极化与阻抗匹配的串联馈电
矩形环路

学生姓名:

林乐霄

学 号:

201883270440

学 院:

电子与信息工程学院

专 业:

电子科学与技术

指导教师:

朱熙铖

二〇二二年四月十一日

目 录

1. 绪论.....	4
1.1 宽带圆极化天线阻抗匹配研究现状.....	4
1.2 本文的研究意义.....	4
1.3 文章的主要内容.....	4
2. 天线的基本知识.....	5
2.1 天线的介绍.....	5
2.2 天线的基本参数.....	5
2.2.1 天线的方向系数.....	5
2.2.2 天线效率.....	6
2.2.3 增益系数.....	7
2.2.4 电压驻波比.....	7
2.3 天线圆极化.....	7
2.3.1 圆极化介绍.....	7
2.3.2 圆极化的数学表示.....	8
2.4 阻抗匹配.....	9
2.4.1 阻抗匹配的分类.....	9
2.4.2 阻抗匹配的方法.....	9
3. 模型设计.....	10
3.1 模型介绍.....	10
3.2 结构参数.....	10
4. 仿真过程及结果.....	11
4.1 仿真过程.....	11
4.2 仿真结果.....	14
4.2.1 电压驻波比的分析.....	14
4.2.2 轴比的数值分析.....	14
4.2.3 输入阻抗.....	15
4.2.4 辐射图.....	15
5. 总结与展望.....	16
5.1 此模型研究对于无线输电技术应用的展望.....	16
5.1 本文的总结.....	17
参考文献.....	18
致谢.....	19

两个用于宽带圆极化与阻抗匹配的串联馈电矩形环路

林乐霄

南京信息工程大学电子与信息工程学院，江苏 南京 210044

摘要：在本篇文章中你将看到如下一个用于宽带圆极化和阻抗匹配的两个矩形环路的设计。这两个用于宽带圆极化和阻抗匹配的矩形环路将在一个无限的接地面上方，每个环路都与一个短偶极子的两端进行连接。该短偶极子将由同轴电缆通过接地层面完成馈电。每个环路上都有一个缺口，该缺口是用来得到圆极化效果的。缺口的位置对于圆极化的效果起着控制作用。在模型设计中，缺口的位置，短偶极子的长度，环路离地面的高度以及矩形的形状对于取得一个好的轴向比，电压驻波比都起着重要的作用。在本次模型中，轴向比带宽 ($\leq 3dB$) 和电压驻波比带宽 (≤ 2) 分别为 18%和 22%。通过仿真基本完成对参考文献的复现工作。

关键词：圆极化；天线；阻抗匹配；矩形环路

Two Rectangular Loops Fed in Series for Broadband Circular Polarization and Impedance Matching

Lexiao Lin

School of Electronic & Information Engineering, NUIST 210044, China

Abstract: The paper followed below is introduced a design on two rectangular loops fed in series for broadband circular polarization and impedance matching. These two rectangular loops are above an infinite ground plane. Each loop is connected to each end of a short dipole fed by short dipole fed by a coaxial cable through the ground plane. One gap on the loop is developed to get circular polarization and the position of the gap controls the sense of circular polarization. The position of the gap, the length of the short dipole, the height of the loops above the ground plane and the shape of the rectangle play an important role in getting a good axial ratio and voltage standing-wave ratio. Respectively, the AR bandwidth ($\leq 3dB$) and VSWR bandwidth (≤ 2) are 18% and 22%. The computed result has a great agreement with the result in the reference.

Key words: circular polarization; antenna; impedance matching; rectangular loops

1. 绪论

1.1 宽带圆极化天线阻抗匹配研究现状

在过去的 30 多年，人们在宽带圆极化天线的研究和设计已经有了很成熟的研究。对于宽带圆极化环路天线已经有了多种多样的设计应用，例如：装有环形天线的单极子天线[1]，L 探头近距离贴片馈电天线[2]。但对于一个单反馈天线，考虑到圆极化的同时在宽频带上完成阻抗匹配并不是件容易的事[3]。人们通常采用两个相位差 90 度的馈电来扩展频带[4]。目前，两个菱形环路组成的线天线已经在不考虑阻抗匹配的情况下完成了宽带圆极化的研究[5]。

1.2 本文的研究意义

该选题包含了天线和电磁方面的完备知识要求，对学生的知识掌握有着复习回顾的作用并且通过仿真设计，可以让学生将所学的知识投入到实际的使用当中，做到理论与实践的结合。完整的阅读文献建模仿真过程能够让学生对后续的研究生阶段的工作有个初步的概念。

利用 HFSS 仿真软件对设计的两个用于宽带圆极化与阻抗匹配的串联馈电矩形环路进行仿真实验。学会熟练使用 HFSS 和自行查阅论文，学习新软件的能力。完善阅读全英文文献的能力，为后续的研究生阶段打下研究的基础和对工程设计有初步的了解。

在本文中，你将看到一个在圆极化完成的同时又考虑到阻抗匹配的两个矩形环路。这显示了同时完成宽带圆极化和阻抗匹配两项要求的可行性。

1.3 文章的主要内容

本文在参考文献的基础下，对一种两个用于宽带圆极化和阻抗匹配的矩形环路进行了一次复现。本文的主要内容如下：

第一章，主要介绍宽带圆极化天线阻抗匹配的研究现状、本文的研究意义以及本文主要内容安排。

第二章，介绍天线的相关基本知识和分析方法。

第三章，详细描述环路设计模型的结构和相关数值参数。

第四章，仿真过程描述以及最终仿真结果展示。

第五章，基于本文内容给出本文的总结，并对该次模型给出对于全球无线输电，输能系统的展望。

2. 天线的基本知识

2.1 天线的介绍

天线，是一种金属结构的设计物。它被用于捕获或者传输无线电磁波。人们可以从生活中的一切常见物品中看到它的存在。小到一个收音机，一个电视，一个手机；大到一个可以捕获宇宙几百上千公里外的信号的卫星上，天线都发挥着巨大的作用。

常见的天线形状有很多种，碗型，线型等等。如图 1，是美国空间通讯和导航使用的一种特制的碗型天线。该天线专注于一个定点信号的接收，也被称为抛物面天线。这种碗状结构的设计可以让天线同时具有捕获和传输电磁波的作用。通常，这些天线垂直，水平运动固定角度和时间以便捕获和传输信号。



图 2.1

2.2 天线的基本参数

2.2.1 天线的方向系数

方向系数：距离天线一段距离处，该天线在最大辐射方向上的辐射功率流密度（ S_{\max} ）和相同辐射功率下的理想无方向性天线在相同距离处的辐射功率流密度（ S_0 ）的比值（ D ），即：

$$D = \frac{S_{\max}}{S_0} = \frac{|E_{\max}|^2}{|E_0|^2}$$

2.2.1

在此定义下：

设天线的实际辐射功率为 P_R ，在最大辐射方向上 r 处，辐射功率流密度为 S_{\max} ，场强为 E_{\max} 。再设一个理想的无方向性天线，它的辐射功率为 P_R 不变，其在相同距离上产生的辐射

功率流密度为 S_0 ，场强为 E_0 ，表达式分别为

$$S_0 = \frac{P_R}{4\pi r^2} = \frac{|E_0|^2}{240\pi}$$

2.2.2

$$|E_0|^2 = \frac{60P_R}{r^2}$$

2.2.3

因此，根据方向系数的定义，可得：

$$D = \frac{r^2 |E_{max}|^2}{60P_R}$$

2.2.4

接下来，为了求得辐射功率 P_R ，设天线的归一化方向的函数为 $F(\theta, \varphi)$ ，该天线在任意方向的场强和功率流密度分别为

$$\begin{cases} |E(\theta, \varphi)| = |E_{max}| \cdot F(\theta, \varphi) \\ S(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \text{Re}(E_\theta H_\varphi^*) = \frac{|E(\theta, \varphi)|^2}{240\pi} \end{cases}$$

2.2.5

得功率流密度表达式为

$$S(\theta, \varphi) = \frac{|E_{max}|^2}{240\pi} |F(\theta, \varphi)|^2$$

2.2.6

在半径为 r 的球面上对功率流密度进行面积分，得辐射功率为

$$P_R = \iint_S S(\theta, \varphi) dS = \frac{r^2 |E_{max}|^2}{240\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

2.2.7

将式 2.2.7 代入式 2.2.4，得天线方向系数一般表达式为

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}$$

2.2.8

2.2.2 天线效率

天线效率：设天线的辐射功率为 P_o ，输入功率为 P_i 。那么辐射功率与输入功率的比值即为天线的效率，可表示为 ϑ_A 。

在实际电磁波传输过程中还存在一定的损耗，设为 P_1 。那么天线效率可表示为

$$\vartheta_A = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + P_1}$$

2.2.9

2.2.3 增益系数

增益系数：我们将方向系数与天线效率的乘积定义为天线的增益系数 G 。

$$G = D \cdot \vartheta_A$$

2.2.10

根据增益系数的定义，我们可以得到如下结论：要想让在增益系数的值越大，则天线的方向系数与效率就需要越高。因此，增益系数也是用来评判一个天线方向特性与能量转换综合特性的一个参数。

我们可将式 2.2.4 和式 2.2.9 代入式 2.2.10，得到：

$$G = \frac{r^2 |E_{max}|^2}{60 P_i}$$

2.2.11

由上式，我们可以得到一个天线在实际情况下，最大辐射方向上的场强为

$$|E_{max}| = \frac{\sqrt{60 G P_i}}{r} = \frac{\sqrt{60 D \vartheta_A P_i}}{r}$$

2.2.12

在理想情况下， $D = 1$ ， $\vartheta_A = 1$ ， $G = 1$ ，则

$$|E_{max}| = \frac{\sqrt{60 P_i}}{r}$$

2.2.13

2.2.4 电压驻波比

驻波比：我们将天线输入端的反射系数记为 τ 。天线的电压驻波比为

$$VSWR = \frac{1 + |\tau|}{1 - |\tau|}$$

2.2.14

当反射系数为 0 时， $VSWR = 1$ ，此时，天线将与馈线达成匹配。从而可以将输入端的全部能量送至天线上，这意味着天线将获得最大功率。

2.3 天线圆极化

2.3.1 圆极化介绍

圆极化是电磁波的一种极化状态，该状态在任一点，这个波在相互垂直的方向平面上都有着一个以恒定速率旋转的一个定量。

在电动力学中，电场的强度和方向由其电场矢量定义。在圆极化波的情况下，如图

2.3.1 所示，电场矢量的尖端在空间中的给定点与光在时间和空间中传播时的相位有关。在任何时刻，波的电场矢量表示沿传播方向定向的螺旋线上的一点。圆极化波能够以两种可能的方向之一旋转：顺时针或右旋圆极化，其中电场矢量相对于传播方向以右手方向旋转，以及逆时针或左旋圆极化，其中矢量以左手方向旋转。

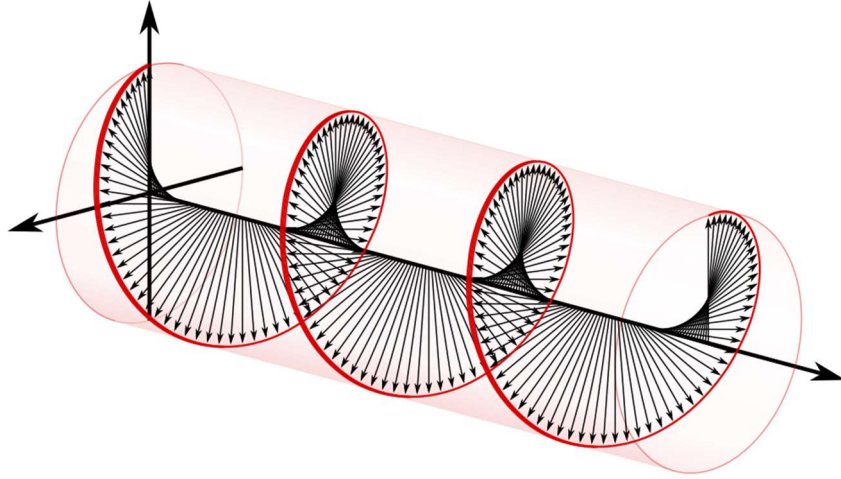


图 2.3.1

2.3.2 圆极化的数学表示

经典的正弦平面波的电场，磁场的电磁波方程式为：

$$E(r, t) = |E| R_e \{ Q | \phi \rangle e^{i(kz - \omega t)} \}$$

2.3.2.1

$$B(r, t) = \hat{z} \times E(r, t)$$

2.3.2.2

其中 k 为波数，

$$\omega = ck$$

2.3.2.3

式 2.3.2.3 中的 ω 是波的角频率， $Q = [\hat{x}, \hat{y}]$ 是一个 2×2 的正交矩阵， c 表示光速。

在这里， $|E|$ 表示的是场的振幅，同时

$$|\phi\rangle \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} \phi_x \\ \phi_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta e^{i\alpha_x} \\ \sin \theta e^{i\alpha_y} \end{pmatrix}$$

2.3.2.4

当 α_y 相对于 α_x 以 $\frac{\pi}{2}$ 弧度旋转时，且 x 与 y 方向上的振幅保持相同，那么这个波就是圆极化的。

此时：

$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix} e^{i\alpha_x}$$

2.3.2.5

如果是加号，则表示为左旋圆极化，减号则表示为右旋圆极化。

如果将基础矢量定义为如下：

$$\begin{aligned} |R\rangle &\stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \\ |L\rangle &\stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \end{aligned}$$

2. 3. 2. 6

那么极化状态可以写成：

$$|\phi\rangle = \phi_R |R\rangle + \phi_L |L\rangle$$

2. 3. 2. 7

其中：

$$\begin{aligned} \phi_R &\stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \theta + i \sin \theta e^{(i\delta)}) e^{(i\alpha_x)} \\ \phi_L &\stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \theta - i \sin \theta e^{(i\delta)}) e^{(i\alpha_x)} \end{aligned}$$

2. 3. 2. 8

并且：

$$\delta = \alpha_y - \alpha_x$$

2. 3. 2. 9

2. 4 阻抗匹配

2. 4. 1 阻抗匹配的分类

由于在电磁波的实际传输过程中存在一定的损耗，为了使得天线的效率和功率尽可能的大。通常我们还需要考虑阻抗匹配。

在传输线上，阻抗匹配有三种状态，分别为：负载阻抗匹配、原阻抗匹配、共轭阻抗匹配。

2. 4. 2 阻抗匹配的方法

对于传输线系统，实现阻抗匹配的方法一般分为： $\frac{\lambda}{4}$ 阻抗变换器法、支节调配器法。其中，支节调配器法又分为：串联单支节调配器和并联调配器。

相应的具体匹配操作，读者可以自行通过互联网进行查阅。本文不在此涉及相关具体阻抗匹配方法的数学表达形式的表达介绍。

3. 模型设计

3.1 模型介绍

在本文中所采用的模型，你将看到该模型是用于宽带圆极化和阻抗匹配的两个矩形环路的设计。这两个用于宽带圆极化和阻抗匹配的矩形环路将在一个无限的接地面上方，每个环路都与一个短偶极子的两端进行连接。该短偶极子将由同轴电缆通过接地层面完成馈电。每个环路上都有一个缺口，该缺口是用来得到圆极化效果的。缺口的位置对于圆极化的效果起着控制作用。如图 3.1 所示。

在模型设计中，缺口的位置，短偶极子的长度，环路离地面的高度以及矩形的形状对于取得一个好的轴向比，电压驻波比都起着重要的作用。

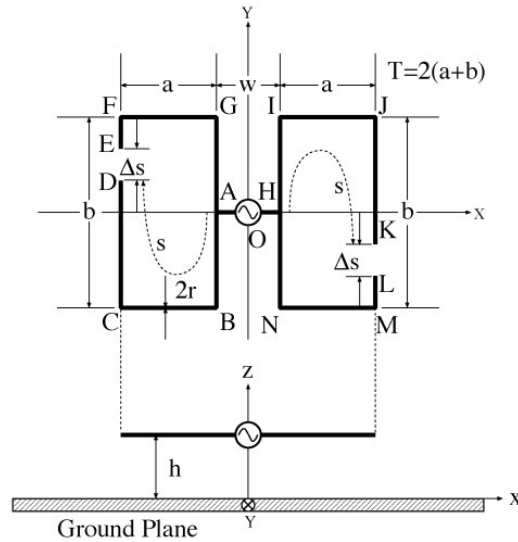


图 3.1

3.2 结构参数

如图 3.1 所示，环路位于平面上方 h 高度处，该平面为无限接地面。由于两个矩形环路成中心对称图形，在此，我们只需讨论半个矩形的数据参数即可。

在图 3.1 所展现的结构中，该环路将由同轴线构成，我们将线圈的直径设为 $2r$ 。该直径长度 $2r$ 是一个对于中心频率 f_0 所对应的波长 λ_0 而言是一个非常小的值，我们将在后续的模拟仿真中忽略。

接下来设矩形的长为 a ，宽为 b ，矩形的周长为 T ，则 $T = 2(a + b)$ 。在该矩形的一边，有个缺口。其缺口宽度我们设置为 Δs 。缺口位置距离连接馈电口出 A 点或者 H 点的路程长度为 s 。

对于馈电中心，我们将用一段同轴线所形成的偶极子连接两个环路，你将看到如图 3.1

所示，该段距离我们将设为 w 。因此，对于单个环路，该段距离将为 $\frac{w}{2}$ 。

在此次仿真中，我们的中心频率 f_0 将设置为 1.5GHz。根据理论计算，大约在 $h = 0.26\lambda_0$ ， $s = 0.787\lambda_0$ ， $w = 0.05\lambda_0$ ， $\Delta_s = 0.0295\lambda_0$ ， $T = 1.45\lambda_0$ 时，取得最好的结果。在本次所仿真的中心频率下，即 $h = 52 \text{ mm}$ ， $s = 157.4 \text{ mm}$ ， $w = 10 \text{ mm}$ ， $\Delta_s = 5.9 \text{ mm}$ ， $T = 290 \text{ mm}$ 。

4. 仿真过程及结果

4.1 仿真过程

首先，我们需要新建一个 HFSS 的工程文件，接下来，我们按照如图 4.1.1 所示，设置求解类型。

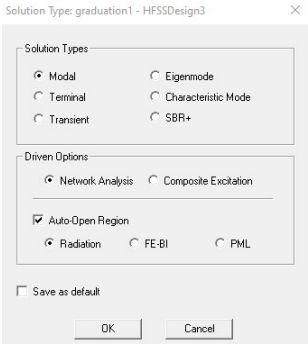


图 4.1.1

设置好求解模式后，我们将开始按照第三章中所提到的模型和结构参数进行建模。这里，为了方便后续的优化，我们需要设置变量参数。如图 4.1.2 所示。

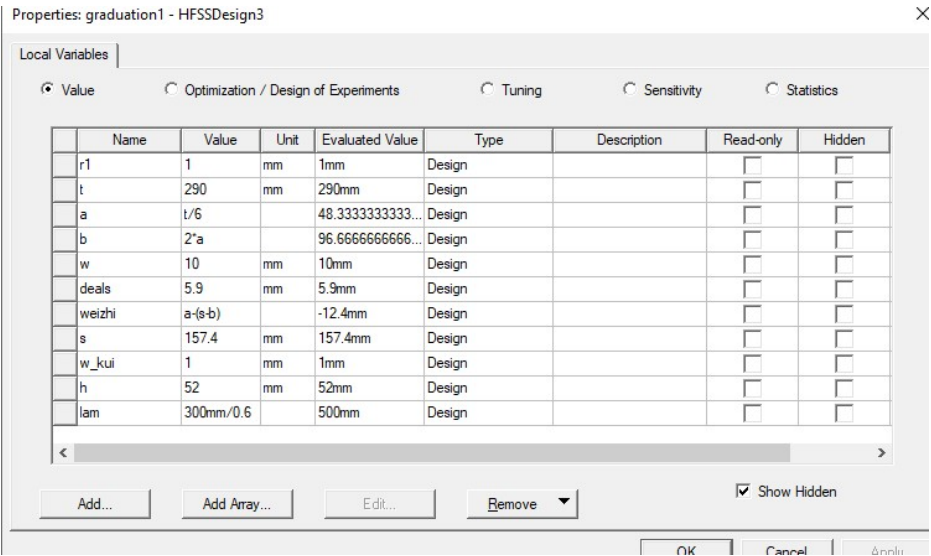


图 4.1.2

在设置好变量参数后，我们正式开始建模。由于模型是成轴对称结构，在这里我们实际

上只需要画好半边的模型就可以了，随后对其进行复制。由于线天线的直径相对于中心频率而言实在是一个很小的值，为了方便建模我们可以忽略线天线的直径。在此我们可以选择矩形画图功能，按照第三章的数据，画好矩形。同时，利用 HFSS 中的截取，剪切，合并等功能，做出缺口。最终结果如图 4.1.3 所示。接下来，由于对称性的关系，我们选择关于原点对称的功能，将建好的半边模型绕中心旋转 180 度，得到完整的两个环路，结果如图 4.1.4 所示。

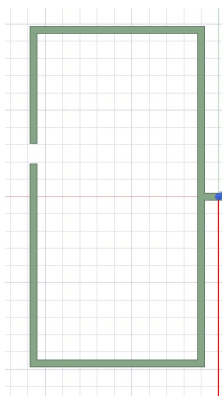


图 4.1.3

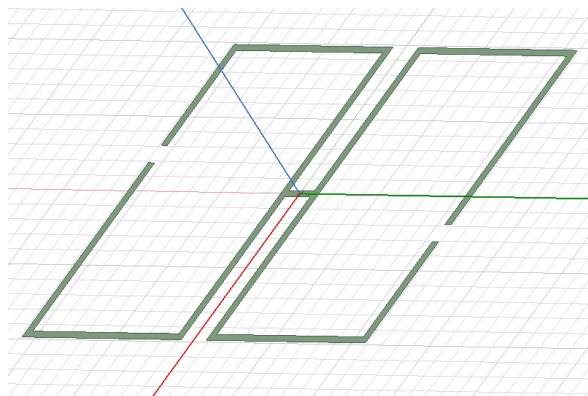


图 4.1.4

在建立好环路模型后，就已经完成了复现工作的一大半。接下来，我们需要在环路的下方画一个矩形来模拟接地面。最终结果如图 4.1.5 所示。

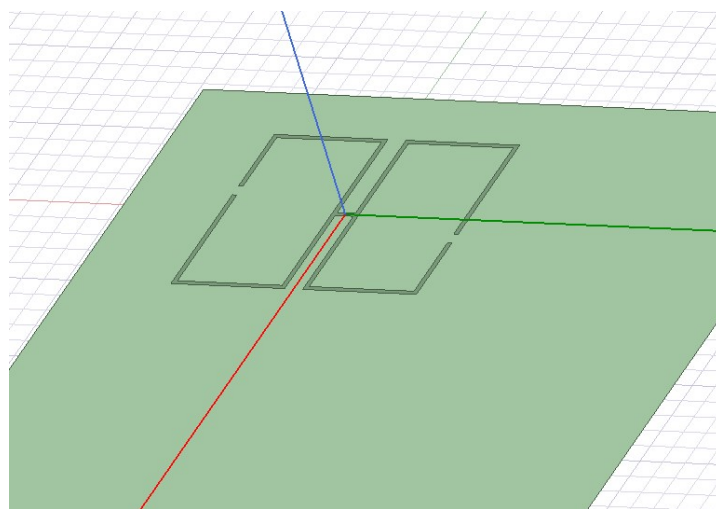


图 4.1.5

至此，我们已经完成了建模的工作。接下来，我们将对模型进行特征设置以便其在仿真时提供相应的材料参数。

我们将环路设置为 **perfect E**，将接地面的设置为 **Finite Ground**。这部分设置是为了完成仿真的边界条件设置。其数值如图 4.1.6 所示。

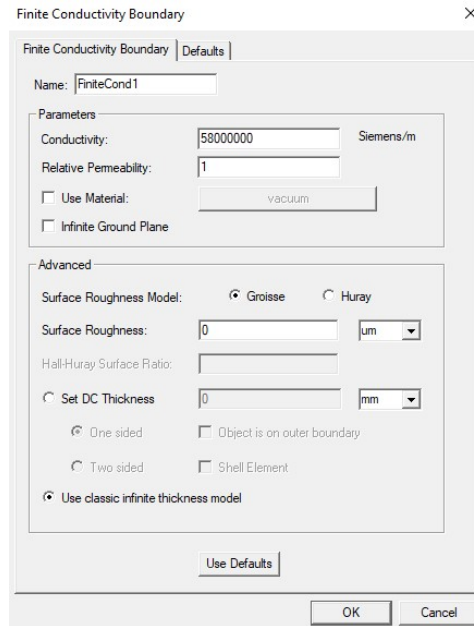


图 4.1.6

接下来，我们需要设置激励以便完成馈电。设置如图 4.1.7。

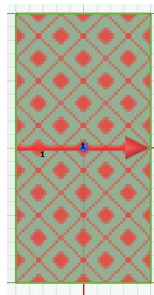


图 4.1.7

最后我们按照如图 4.1.8 设置扫频。至此我们的建模工作就已经全部完成了。在仿真前，我们需点击检查功能进行一次检查。发现并无问题，运行计算仿真。

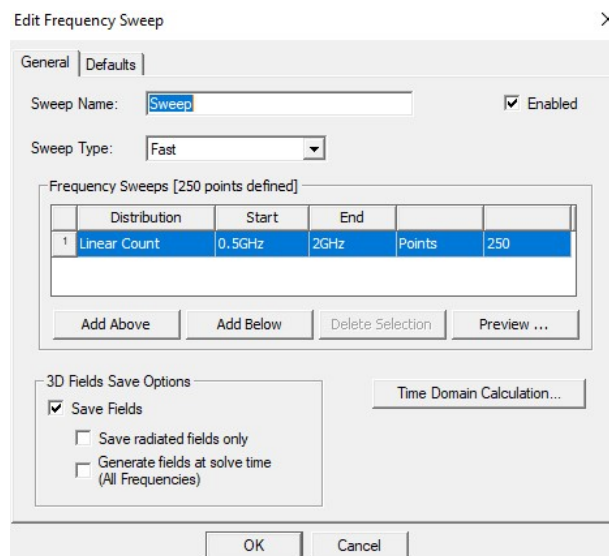


图 4.1.8

4.2 仿真结果

4.2.1 电压驻波比的分析

待仿真结果完成后，我们将导出仿真结果。首先，我们来看一下电压驻波比 VSWR 的结果，如图 4.2.1 所示：

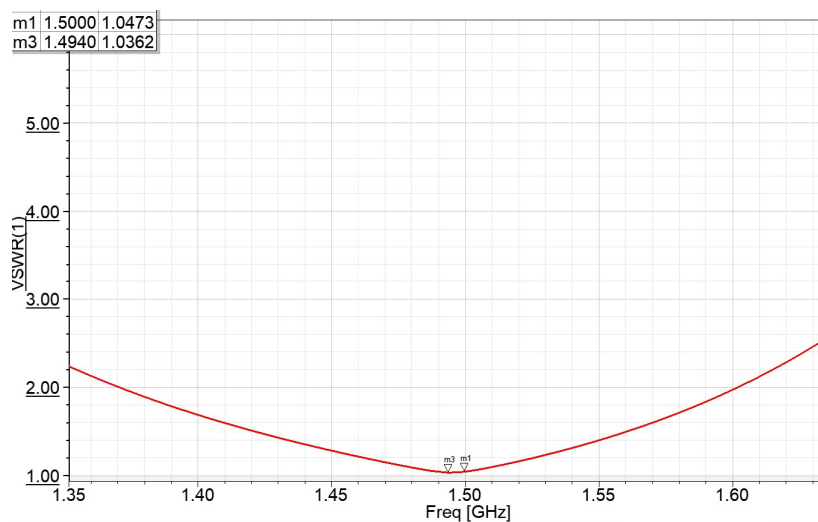


图 4.2.1

在图 4.2.1 中所展现的数值中，你会发现，在中心频率 1.5GHz 附近出现 VSWR 的最小值。当频率为 1.4949GHz 时，VSWR 达到最小值为 1.0362。这与中心频率 1.5GHz 处的 1.0473 值的距不大。由此可以看出该线天线在中心频率附近已达到很好的阻抗匹配。

4.2.2 轴比的数值分析

接下来，我们再来看看轴比的仿真结果。如图 4.2.2 所示：

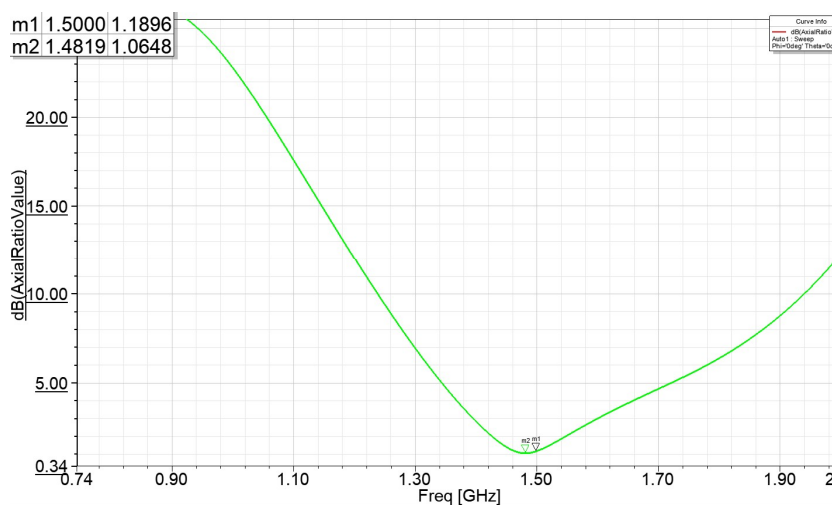


图 4.2.2

如图 4.2.2 中所展现的数值中，你会发现，在中心频率 1.5GHz 附近出现 AR 的最小值。当频

率为 1.4819Ghz 时，AR 达到最小值为 1.0648。这与中心频率 1.5Ghz 处的 1.1896 值的差距不大。由此可以看出该天线在中心频率附近已达到一个很好的圆极化效果。

4.2.3 输入阻抗

接下来，我们再来看看输入阻抗的结果。如图 4.2.3 所示：

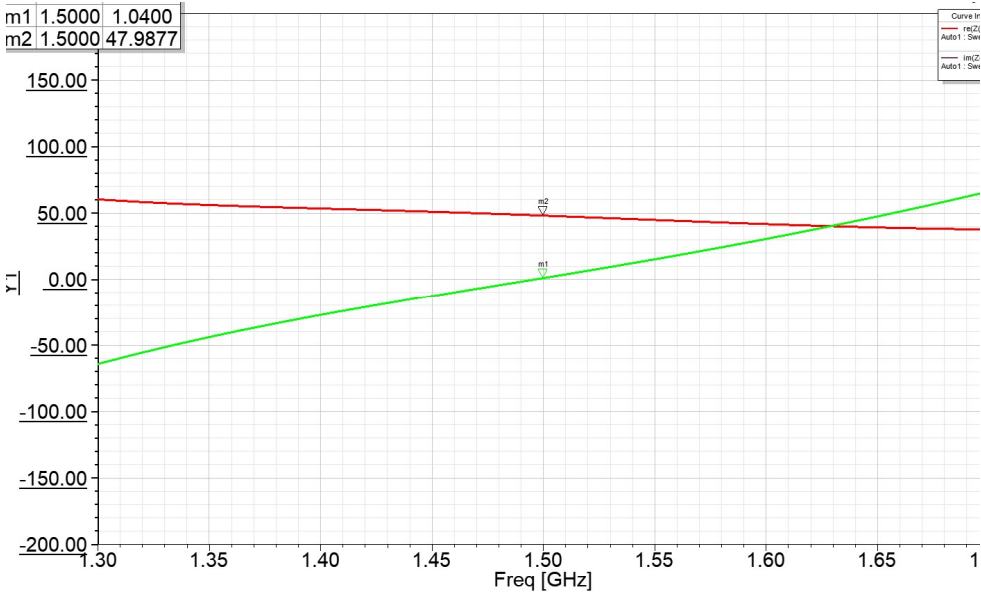


图 4.2.3

如图 4.2.3 中所展现的数值，你可以很直观的看到，在中心频率 1.5GHz 时，天线系统的输入阻抗为 47.9877 欧。

4.2.4 辐射图

在看完输入阻抗后，我们再来看看天线的辐射分布，如图 4.2.4 所示：

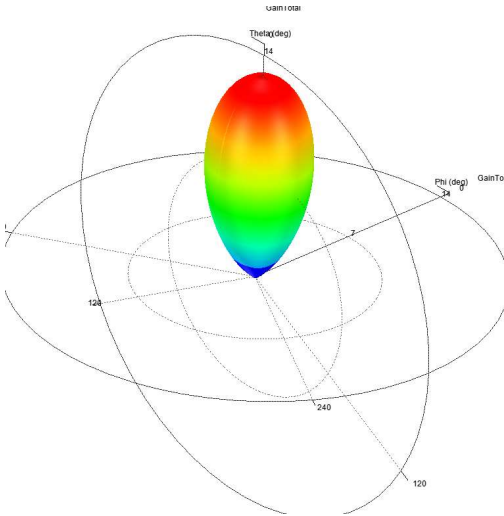


图 4.2.4

在图 4.2.4 中，你可以很直观的看到天线的辐射情况，在中心频率 1.5GHz 下，在图像的最高处，我们将得到 12.7dBi 的值。

5. 总结与展望

5.1 此模型研究对于无线输电技术应用的展望

在 1904 年，尼古拉·特斯拉发现了可以传输电能并不需要通过电线[6]。从这一刻起，无线输电正式进入了人类文明的考虑范围。尽管在 20 世纪人们并没有对无线输电技术产生高度关注，但不可否认的是，建成全球无线输电输能系统不再仅仅是尼古拉·特斯拉的个人梦想。它已引起了许多人的思考。百年来，无数的科学家，工程师，无数的科研人员都对无线输电技术进行研究和尝试。虽然并没有取得实质性的突破，但无线输电技术已经有了实际应用的能力，例如：手机的无线充电。

虽然如此，我们对无线输电技术的欲望并不止步于此。我们依旧在寻找着能够实现远距离，跨市区，跨州府，跨地区的超距离无线输电系统。但似乎上帝并不想让人类掌握驾驭能量的能力。我们目前的所有理论依旧基于尼古拉·特斯拉当时提出的理论基础，并没有任何本质上的突破。目前，市面上达到可以应用的输电方式有：传统的耦合式输电、激光输电、微波输电。但所有的方法都是为了解决也同时有待解决一个问题：效率。

虽然无线输电是可行的，但它的损耗实在是太大了。在传播中，能量在空间中的损耗实在太大，并且速度很快。以至于我们无法将能量送到很远的地方。对于传送信息所需要的能量而言，传输可供设备使用的能量实在是太过于巨大了。这也是为什么我们现在可以实现全球的无线网络系统，却依旧无法实现全球输电系统的原因。从本质上看，无线电系统也可看成全球无线输电系统的一部分。

由此可见，要想实现无线输电系统，我们就必须要解决能量损耗的问题。对此，解决能量损耗，提高传输效率是不仅仅是输电系统的追求，也是其他一切传输系统的追求。因此，该模型在宽带下可以同时实现圆极化和阻抗匹配，这种结构使得在满足宽带圆极化的条件下，我们也可以很好的实现阻抗匹配。这也就意味着我们可以得到很好的电压驻波比，提高天线的传输效率。

与此同时，由于圆极化可以在线极化天线接收的条件下可以完成全方位的接收，在结合了高传输效率的加持下。我们对于能量的节省和利用将达到新的高度。

在此，笔者认为这对于解决全球能源问题也是一个小小的进步。如果，我们真的可以成功的实现超远距离的有效的能量传输问题。我们就可以直接从空间中获取能量。直接利用太阳，没有传输线的限制和能量损耗，我们将可以将电能输送到全球各地。无论是偏远的乡镇地区还是人类难以涉足的巅峰之上。人们都可以随时从空间中通过接收装置从总发射点接收能量和信息。

让我们共同期待那一天的到来。

5.1 本文的总结

本篇文章着重介绍了两个用于宽带圆极化和阻抗匹配的矩形环路的研究和结构设计，并且利用 HFSS 软件，对其进行了复现工作。

文章首先介绍了宽带圆极化和阻抗匹配的研究现状并阐明了此次参考论文完成复现工作的意义与价值。让读者明白，完成这一系列的复现工作，需要学生掌握电磁相关的基础知识和熟练使用 HFSS 软件的能力以及阅读外文文献的能力。在复现过程中，学生的建模能力也会有着相应的提高。为以后的研究生学习工作打下基础。

接下来，文章从天线的基本知识入手。介绍了天线的基本参数包括：天线的方向系数、天线的效率、增益系数、电压驻波比。接着，介绍了天线的圆极化相关内容，包括：圆极化的基本知识的介绍和圆极化的数学形式的表达。让读者对天线圆极化有一个初步的了解和概念。紧接着圆极化的内容，文章引入了阻抗匹配的概念，包括了：阻抗匹配的类型和阻抗匹配的常用方法。

接下来，将进入复现工作部分。文章首先介绍了这两个用于宽带圆极化和阻抗匹配的矩形环路的模型。为读者阐明了模型的基本结构和基本参数。让人们对于模型的结构有一个直观而详细的了解。

然后，文章开始详细描述在 HFSS 软件的环境下搭建模型的步骤，方便读者一步一步毫无障碍的了解在 HFSS 软件中构建好模型和参数，仿真环境设置的全部过程。在建好模型以后，本文展出了主要的仿真结果包括：电压驻波比、轴比、输入阻抗、以及辐射图。根据所仿真出来的结果，我们可以得到如下结论：模型在中心频率 1.5GHz 下能够得到很好的电压驻波比和轴比，表示着该线天线能够很好的同时实现宽带的圆极化和阻抗匹配。

最后，文章给出来，关于此模型用于宽带圆极化和阻抗匹配的矩形环路的研究在无线输电系统方面的应用的可能性的展望。希望有朝一日，能够实现全球范围内的无线输电、输能技术，搭建成功全球无线输电、输能系统。

参考文献

- [1] E. E. Altshuler, "A monopole loaded with a loop antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, pp. 787–791, June 1996.
- [2] Y. X. Guo, C. L. Mak, K. M. Luk, and K. F. Lee, "Analysis and design of L-probe proximity fed-patch antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, pp. 145–149, Feb. 2001.
- [3] W. S. Chen, C. K. Wu, and K. L. Wong, "Square-ring microstrip antenna with a cross strip for compact circular polarization operation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 1566–1568, Oct. 1999.
- [4] X. M. Qing and M. Y. W. Chia, "Broadband circularly polarized slot loop antenna fed by three-step hybrid coupler," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 1210–1211, July 1999.
- [5] Makoto Sumi, Kazuhiro Hirasawa, Senior Member, IEEE, and Song Shi, "Two Rectangular Loops Fed in Series for Broadband Circular Polarization and Impedance Matching," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, pp. 551–554, Feb 2004.
- [6] Nikola Tesla, "The transmission of electrical energy without wires," *Electrical World and Engineer*, vol. 1, pp. 21–24, 1904.

致谢

时光荏苒，四年的大学生活即将结束。在这大学四年里，我学到了很多电子电磁方面的知识。除了知识之外，更多的是为人处世和社会运作的规则。了解到理想和现实残酷的相平衡相结合的重要性。

首先，我需要感谢我的导师朱熙铖，感谢他在学术和人生学业选择方面的悉心教导。是他在大一时答应刚刚大一入学的我可以去研究生办公室和研究生师兄师姐们一起学习工作的机会和体验。这看似无所谓的一个决定，给了我对自己的认可和自信。在此我还要感谢我的工程创造学老师吴礼福和量子力学老师倪波，感谢他们分别对我的《基于定向天线无线输电实现下的结合大数据智能化全球供能系统》和《基于量子效应来看意识与物质的相互作用》两篇文章的发表中所相关想法的建议和指导。以及在大三阶段，对于申请美国研究生的我，需要在此感谢朱熙铖、吴礼福、赵建国三位老师愿意为美国研究生申请材料中撰写推荐信的支持。你们的评价对我录取波士顿大学起着很重要的作用。

不仅仅是老师，在大学生活中我的同学和朋友也给了我很多的帮助。感谢盛泽轩对我电子设计大赛的指导，感谢辅导员和电信院的其他同学的互相帮助。特别感谢我的三位舍友张志淇、郜海、周昊三年的陪伴和互助。

同时感谢父母的支持，是他们的支持让我能够有实现自己梦想的机会。感谢他们为我付出的不计回报的一切。希望他们能够身体健康，也希望自己能够成为他们一生的骄傲与自豪的对象。

感谢参与论文评审的老师，谢谢你们能够抽出自己的时间在百忙之中对我的文章进行评审和提出建议，以便帮助我查漏补缺，在学业上进一步的完善自己。

最后，再次感谢我的家人、老师、朋友，你们是组成我人生的永远无法抹去的一部分。在我迷茫是予以指导，在我痛苦时予以安慰，在我失利时予以激励，在我成功时予以分享的机会。