

一种矩形微带整流天线的研究与设计*

吴苏敏,叶小龙,申世军,李晓宁

(电子科技大学 机械电子工程学院,四川 成都 611731)

摘要:微波整流是无线输电中的一个重要环节,为完成微波能量的接收,设计了一个结构简单、整流效率高的贴片矩形微带整流天线,此整流天线包括矩形微带天线、输入低通滤波器、整流二极管及输出滤波器。该整流天线的面积小,配合其他装置组成的微波输电系统,可方便地应用于传统有线输电无法应用的场合。通过系统仿真以及实验测试,验证了整流天线的可行性及其高效率,实际测量后计算出整流效率高达 63.4%。

关键词:微波;无线输电;整流天线

中图分类号: TN74

文献标识码: B

文章编号: 1674-7720(2013)20-0091-03

Research and design of rectangular microstrip rectifying antenna

Wu Sumin, Ye Xiaolong, Shen Shijun, Li Xiaoning

(Mechatronics Engineering College, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Microwave rectification is a crucial part of power wireless transmission. To complete the receiving of microwave energy, it designed a rectangular microstrip patch rectifying antenna with simple structure and high efficiency rectification, which contains a rectangular microstrip antenna, the input low pass filter, rectifier diode, and the output filter. Rectifying antenna area is small, combined with other devices could form the microwave power transmission system, which can be easily applied to occasions where traditional wired transmission cannot be used. It was verified the feasibility and high efficiency by the system simulation and lab test, and after actually measured could calculate the rectifier efficiency is as high as 63.4%.

Key words: microwave; power wireless transmission; rectifying antenna

微波无线输电是近几年各机构的研究热点^[1-3]。微波电能传输的一般过程是,利用射频信号源将直流电转换成微波信号,即 DC-RF;经过功率放大器(多级)将微波功率放大后辐射至自由空间,再由整流天线接收微波能量并整流,为负载提供直流电能。无线输电的原理与微波传送信号是相通的,如果使用微波传送能量就必须要有将微波整流为直流的器件,故整流天线应运而生并成为微波输电的关键技术^[4]。

微带整流天线由整流电路、滤波器、微带天线组成,这种接收天线与整流电路相结合,用来将微波转换为直流电平的技术通常称为整流天线技术^[5]。微带天线是最近 30 多年来逐渐发展起来的一类新型天线,因其体积小、质量轻、结构简单等优点被广泛应用于射频微波通信接收系统及其他无线电系统中。现阶段整流电路模型一般

有半桥、全桥等整流模型,但是实际应用中,单个二极管的整流模式被认为是最简单、最有效、最经济的整流模式。本文首先介绍了微带整流天线的原理及结构,在此基础上依次完成了微带整流天线系统各个部分的设计,最终对系统进行仿真与测试,得到了较为理想的效果。

1 微带整流天线原理及结构

如果将接收天线等效为内阻为 R_s 的电压源 V_s ,则加入输入滤波器与输出滤波器,使用单个理想整流二极管并联的闭环整流天线电路模型如图 1 所示^[6]。

在整流电路中需要加入滤波器来消除非线性元件(整流二极管)产生的高次谐波对电路的影响。而滤波器的设计并不是简单的通基波、阻谐波,这种方法效率低,且很大一部分微波能量变成热量散发出去。

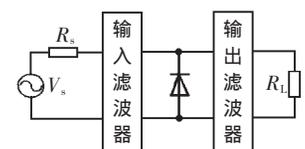


图 1 单整流二极管的整流天线模型

* 基金项目: 国家自然科学基金(60971037)

应用奇葩

Example of Application

所以,为提高整流效率,本文采用新式微带整流天线设计方法,输入滤波器截止高次奇次谐波,允许基波与偶次谐波通过,输出滤波器允许直流和偶次谐波通过,截止基波与高次奇次谐波,因为偶次谐波在负载上做功为零,所以输出滤波器允许偶次谐波通过不会对负载产生不良影响^[7]。

2 微带整流天线设计

2.1 矩形微带天线的设计

矩形微带天线一般有两种馈电方式——侧馈与背馈,就本文的整流天线来讲,侧馈是比较方便的方式。本文使用 Rogers RO4350B 板材,介电常数为 3.8,但是板材经过刻蚀后介电常数将会发生变化,故取其经验值介电常数为 3.3,厚度 $h=0.762$ mm,使用微波频段为 2.45 GHz,将此 3 个数据代入式(1)~式(4),计算矩形微带天线的几何尺寸:

$$W = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{2}{\epsilon_r + 1} \right)^{\frac{1}{2}} = 39.52 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} = 3.95 \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{\epsilon_c + 0.3}{\epsilon_c - 0.258} \frac{(W/h) + 0.264}{(W/h) + 0.8} = 0.358 \text{ mm} \quad (3)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_c}} - 2\Delta L = 30.447 \text{ mm} \quad (4)$$

其中 W 为微带天线宽度, c 为电磁波传输速度, f_0 为微带天线中心频率, ϵ_r 为基板介电常数, L 为基板长度, h 为基板厚度。馈线的几何尺寸由 ADS2009 的计算工具 LinCalc 来计算,设置好各参数后得到馈线宽度为 1.767 mm,长度为 35.96 mm。但是在随后的设计过程中涉及匹配电路,所以馈线的长度在此处可以任意选取,馈线过长会影响天线的体积,故本文选取馈线长度为 6 mm。

使用 ADS2009 的 Layout 功能建立微带天线的模型,进行版图初步仿真。由仿真之后得到的 S 曲线发现中心频率的发射系数 S11 比较大,输入阻抗为: $Z_0 \times (0.227 - j0.000098) \Omega$,需要在原理图中进行天线匹配,将所得阻抗等效为一个电阻和电容的串联,对匹配优化后的微带天线进行仿真,结果如图 2 所示,可知输入阻抗 $Z_{in} = Z_0 \times (1.077 + j0.117) \Omega = (53.85 + j5.85) \Omega$,匹配效果良好。

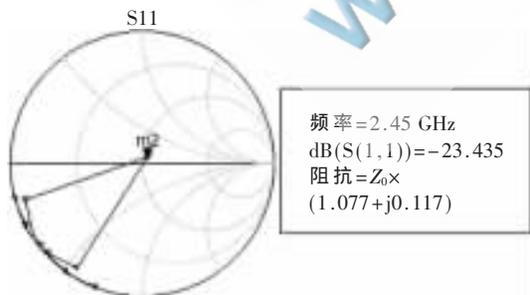


图 2 匹配后微带天线仿真

2.2 整流二极管及匹配电路设计

本文使用的二极管型号为 HSMS-282B, SOT323 封

装,二极管的最大反向电压为 15 V,首先对二极管进行扫描,确定在要求的输入功率下二极管反向电压不会超过 15 V。使用谐波平衡控件 HB、大信号仿真控件 LSSP 及参数扫描控件 PARAMETER SWEEP 对二极管的电压-功率扫描,负载为 300 Ω ,扫描结果图如图 3 所示。结果显示输入功率 P_{in} 在 -4 dBm~2 dBm 时,二极管侧最大反向电压为 0.305~0.475 V 左右,满足器件要求,同时由 $Z_{in1} = Z_{in}(S11, PortZ1)$ 计算出 $P_{in} = -4$ dBm 时系统的输入阻抗为 $Z_{in} = (46.633 - j244.508) \Omega$,需要对其进行阻抗匹配。

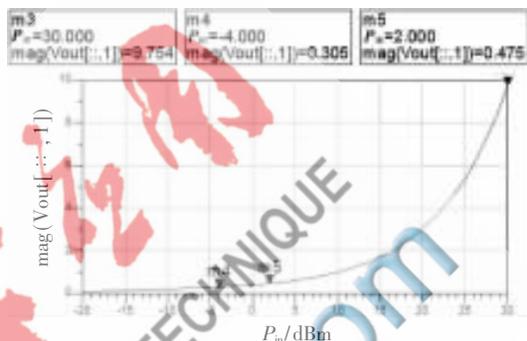


图 3 二极管扫描结果图

将输入滤波器用大电容代替,电容选定 $C=1.0 \mu\text{F}$,使用 ADS2009 菜单工具 Passive Circuit DG-Microstrip Circuit 类进行匹配设计。选择 SSMatch 加入电路中,添加 S-PARAMETERS 控件,两个 Term 端口设置如下:将输出端口 Term2 特性阻抗设置为 $(46.633 - j244.508) \Omega$ 。使用大信号与谐波平衡对 DA-SSMatch 进行扫描仿真,但是此处将 PORT1 输入功率定为 -4 dBm,PORT1 功率为 Freq[1]。大信号扫描参数为频率 Freq[1]=2.45 GHz~3 GHz。

将仿真优化后的匹配电路加入系统电路中,将输入滤波器用理想低通滤波器代替。输出滤波器可以使用 1/4 波长微带线加电容来设计,频率为 2.45 GHz 的 1/4 波长为 30.6 mm,电容值选为 100 pF。仿真结果如图 4 所示,由图 4 可知频率为 2.45 GHz, $P_{in} = -5$ dBm 时系统的 $S(1,1) = -20.343$ dBm,而系统输入阻抗 $Z_{in} = Z_0 \times (0.958 + j0.043) \Omega$,已经非常接近理想的 50 Ω ,匹配效果比较理想。

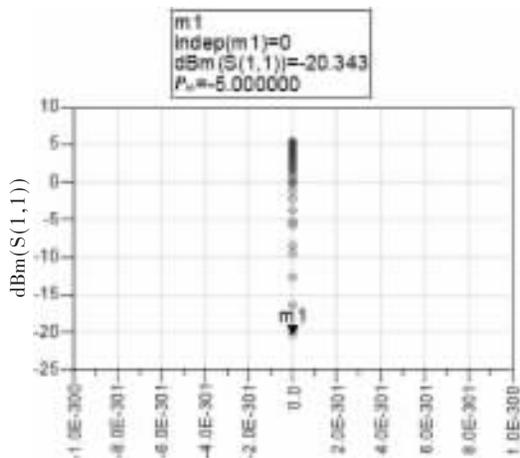


图 4 二极管整流电路匹配结果

2.3 输入低通滤波器设计

使用微带线可以构成的滤波器有很多结构,包括高低阻抗滤波器、交指线滤波器、端耦合微带谐振滤波器、平行耦合微带线滤波器、发卡式滤波器、梳状线滤波器等,本文将采用简单的高低阻抗方式设计低通滤波器,原理图中两个 Term 端口的特性阻抗均为理想的 50Ω 。设计低通滤波器时使用的微带线较多,对此类的原理图设计,使用目标函数控件 OPTIM 及 3 个 GOAL 控件来实时调整各段微带线长度,以满足本文对低通滤波器的设计要求。经 500 次优化协调后,可得频率为 2.45 GHz 时 $\text{dB}(S(1,1))=-29.682$, $\text{dB}(S(2,1))=0$; 频率为 4.05 GHz 时 $\text{dB}(S(1,1))=0$, $\text{dB}(S(2,1))=-12.747$, 均满足设计要求。

2.4 整流天线系统仿真及版图制作

在设计完成微带接收天线、输入滤波器、二极管整流电路、输出滤波器之后,需要进行整流天线的整体仿真与分析。由原理图仿真结果可知 $P_m=-5$ dBm 时, $S(1,1)=-35.999$ dB, 输入阻抗 $Z_m=Z_0 \times (0.972+j0.014) \Omega=(48.6+j0.7) \Omega$, 根据匹配好的原理图来设计 PCB 版图, 使用 ADS2009 特殊功能原理图与版图仿真所得结果如图 5 所示。



图 5 整流天线版图与原理图联合仿真曲线

3 实验测试

出于对电路板性能的考量,没有在电路板上镀锡或者阻焊层,为了测试方便,在整流天线末端加入了一个插针作为直流输出引脚,在整流天线背面焊接一个插针作为接地引脚。

微带整流天线系统的测试使用的器件有:台式电脑一台、MSP430 最小系统(信号源控制电路)、ADF4360 射频信号源、驱动级功率放大器模块(将功率放大至 20 dBm)、矩形喇叭发射天线、整流天线模块、 300Ω 负载、固纬双通道直流电压源 GPS-2303C、固纬频谱分析仪 GSP-827 及其附件、标准环形天线、同轴线缆及转接头、万用表等。在测试中,改变整流天线与喇叭天线的距离,寻找负载的最大电压值,即发射的功率与整流天线的最佳匹配值。在距离喇叭天线大约 10 cm 的地方放置整流天线,用万用表测量负载最大直流电压为 0.325 V, 由远区传输的傅里斯公式得:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 G_r G_t \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_r} \times 100\% = \frac{(V_{DC})^2}{R_L P_r} \times 100\% \quad (6)$$

式中 P_r 表示接收整流天线接收到的功率, P_t 表示发射天线发出的总功率, G_r 表示发射天线的功率增益, G_t 表示接收天线的功率增益, λ_0 表示真空波长, R 是位于发射天线的远区的发射与接收天线间的距离, η 表示总体接收整流效率, P_{DC} 表示直流输出功率, V_{DC} 为直流输出电压, R_L 为负载阻值。

得到整流天线的效率为:

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_r} = 63.4\%$$

测试结果表明, 本文设计的整流天线在小功率微波电能传输系统中是可行的、成功的, 且整流天线具有较高的效率, 最大为 63.4%, 对于微波输电研究具有积极的实验意义。微波输电系统充分利用了电磁场与电磁波理论, 结合实际需求与应用, 摒弃传统的有线传输方式, 为电能传输提供了一种全新的、无线的方式, 可应用于管道机器人、太阳能卫星输电、新能源汽车充电等环境。而作为微波系统中不可或缺的一部分, 本文关于矩形微带整流天线的研究为未来增加微波功率、提高微波整流效率打下了坚实的理论与实践基础。

参考文献

- [1] 王秩雄, 胡劲蕾, 梁俊, 等. 无线输电技术的应用前景[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(1): 82-85.
- [2] 胡大璋, 周兆先. 微波输送电能的新技术[J]. 电子科技导报, 1996(12): 1-4.
- [3] 杨成英, 陈勇. 中程距离无线输电的实现[J]. 科技信息, 2009(3): 410-411.
- [4] 杨雪霞. 微波输能技术概述与整流天线研究新进展[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 770-779.
- [5] 邓红雷, 孔力. 一种实用线极化矩形微带贴片接收整流天线的仿真设计[J]. 微波学报, 2004, 20(4): 68-71, 89.
- [6] 池玉友, 许建军, 秦占豪. 整流天线技术及应用[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 22(4): 29-31.
- [7] 张雪松, 朱超甫, 顾颐. 使用微带天线进行近距离能量传递[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(6): 587-590.

(收稿日期: 2013-07-18)

作者简介:

吴苏敏, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 非接触性电能传输、电机结构设计。

叶小龙, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 非接触性电能传输。

申世军, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 非接触性电能传输。