

文章编号: 1672-2892(2008)02-0131-04

一种用于无线输能的 2.45 GHz 微带贴片整流天线

王九灵, 郭庆功

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要: 为了提高大信号输入下整流天线的整流效率, 利用 Ansoft Designer 仿真软件, 设计制作了一种工作在 2.45 GHz 的微带整流天线, 接收天线采用二元串联微带矩形贴片阵列, 单元贴片之间引入两个短枝节以调节方向图指向; 整流电路采用二极管串联双管倍压电路。实验结果与仿真结果二者吻合良好, 实测得到输入功率为 100 mW 时, 微波-直流转换效率达到 64%, 同单管并联电路相比, 大大提高了整流电路的输入功率, 使整流天线的实际转换效率更高。

关键词: 无线输能; 整流天线; 微带贴片; 转换效率

中图分类号: TN822^{1.4}

文献标识码: A

A Microstrip Patch Rectenna with 2.45 GHz for Wireless Power Transmission

WANG Jiu-ling, GUO Qing-gong

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: The microwave rectenna is a crucial element in Wireless Power Transmission(WPT) system. A rectenna operating at 2.45 GHz is presented. The receiving antenna is an array of two microstrip rectangle patches in series, between which two short stubs are adopted to adjust the antenna pattern. The rectifying circuit is a double-voltage circuit with series dual-diodes, and the experiment results show that it greatly enhances the input RF power compared with single-diode circuit. When the input RF power is 100 mW, the double-voltage circuit achieves a conversion efficiency of 64%, so the practical RF-to-DC conversion efficiency is higher.

Key words: wireless power transmission; rectenna; microstrip patch; conversion efficiency

近年来, 空间太阳能传输(Solar Power Transmission, SPT)和微波无线输能(WPT)越来越受到人们的重视, 微波整流天线是其中一项关键技术。目前, 整流天线中接收天线的形式主要有单极振子天线、平面印刷偶极子天线和微带天线3种形式。微带天线因其具有体积小、重量轻、接收面积大、极化方式灵活、方便组阵、易集成和易加工等优点, 近年来被广泛用于整流天线中接收天线的设计^[1-5]。本文设计了一种工作在2.45 GHz的线极化二元串联微带矩形贴片阵列作为接收天线, 采用微带线串联馈电使天线与整流电路位于同一个平面上, 单元贴片之间引入的两个短枝节可以调节天线方向图的指向。这种结构十分方便扩展, 应用于大型阵列的设计。在以往的整流天线设计中, 整流电路多采用单个二极管并联方式^[1-9]。本文选用串联双管组成倍压整流电路, 不需要增加额外的元件, 不会增加电路面积和复杂度, 电路的输出电压可提高一倍, 同时大大提高了二极管整流电路的输入功率。

1 整流天线设计

整流天线由接收天线、滤波电路和整流电路等部分组成, 它通过接收天线来接收发射天线发射的微波束, 然后经过二极管整流, 将接收到的微波能转化成直流电能输出。

1.1 接收天线设计(二元串联矩形贴片阵列)

工作在2.45 GHz的接收天线光刻在聚四氟乙烯双面覆铜板基片上, 基片厚为2 mm, 介电常数为2.65, 损耗角正切值小于0.001, 导带铜厚为0.035 mm。如图1, 天线总尺寸为180 mm×100 mm, 单元贴片大小为37.5 mm×37.5 mm,

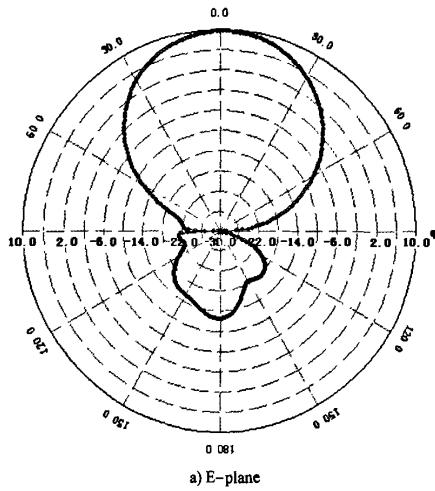
收稿日期: 2007-11-05; 修回日期: 2007-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60471045)

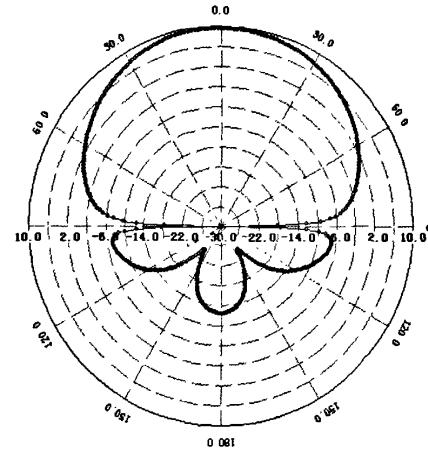
采用微带线串联馈电，端口阻抗为 50Ω 。两个串联贴片之间的两个短枝节，用来调节天线方向图指向。如图2为2.45 GHz天线方向图的测试结果，天线的增益为9.58 dB。

1.2 输入输出滤波器的设计

由于二极管的非线性，电路中将产生高次谐波。输入低通滤波器的作用是截止高次谐波，使基波无损耗通过。在谐波中，二次和三次谐波为主要谐波分量，三次以上谐波的影响基本可以忽略，因此在电路设计中重点考虑消除二次和三次谐波。



a) E-plane



b) H-plane

Fig.2 Measured patterns of the receiving antenna

图2 接收天线测试方向图

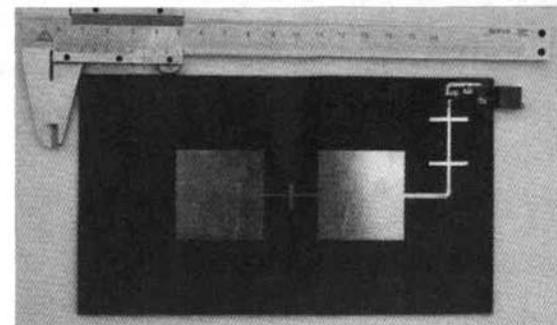
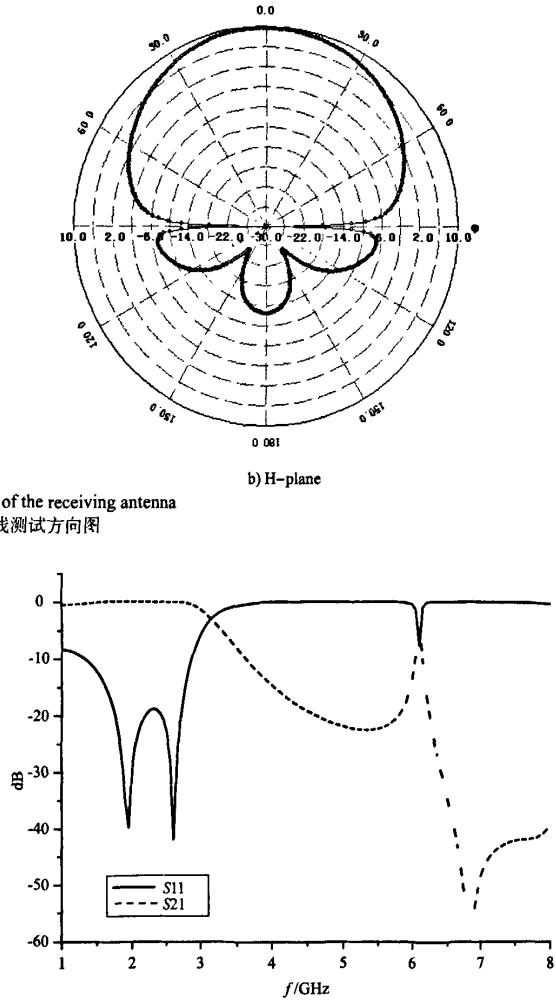
输入低通滤波器采用最简单的高低阻抗结构，为了与天线的输入阻抗保持一致，其输入和输出阻抗都取为 50Ω 。回波损耗和插入损耗测试曲线如图3，在2.45 GHz时滤波器的回波损耗S11和插入损耗S21分别为20.96 dB和0.13 dB，在4.9 GHz时分别为0.09 dB和21.78 dB，在7.35 GHz时分别为0.20 dB和43 dB，表明该低通滤波器能有效地抑制二次及三次谐波。

输出低通滤波器由一个并联在负载端的电容和一段微带线组成。一方面，它使直流通过，截止基波和高次谐波；另一方面，它同输入低通滤波器一起，将高次谐波约束在二者之间，以提高整流效率。二极管和电容之间的微带线又起到调节阻抗匹配的作用，其最佳长度约为工作波长的 $1/4$ ^[9]。

1.3 二极管的选取

整流二极管是整流电路的核心器件，其整流特性决定着整个系统的转换效率。二极管最重要的参数是击穿电压 V_{br} 、零偏结电容 C_{j0} 和寄生串联电阻 R_s 。在选择二极管作为微波整流管时，要根据工作频率以及输入功率的要求，选择合适的二极管。

本文所选二极管型号为Agilent HSMS-286C，封装形式SOT-323，其主要Spice参数为： $V_{br}=7\text{ V}$ ， $R_s=6\Omega$ ，

Fig.1 Photo of rectenna
图1 整流天线实物图Fig.3 Measured S11 and S21 of the LPF
图3 输入低通滤波器测试曲线

$C_{j0}=0.18\text{ pF}$ 。如图4所示, 它包括两个二极管串联, 使用倍压电路, 将3端接在微带线的输入端, 1端和2端分别接地和接微带线的输出端, 这样使得在输入微波的正负半周都有一个二极管导通, 在输出端形成正负电位差, 电路的输出电压提高一倍。

由于二极管是非线性器件, 电路中会出现高次谐波。在高功率输入状态下, 二极管的阻抗会随着输入功率的变化而变化, 因此整流电路只能在一定输入功率范围内实现较好的匹配, 得到较高的转换效率。在设计中, 利用仿真软件中二极管非线性等效模型进行仿真分析, 然后再进行实验验证, 根据实验结果分析改进仿真模型, 如此反复, 以期得到最佳的结构和最高的整流效率。

1.4 整流天线测试

实验测试系统如图5所示, 发射天线使用标准增益喇叭天线, 微波功率源输出功率经放大器放大, 通过定向耦合器输入喇叭天线, 定向耦合器耦合端接功率计监测喇叭天线的输入功率。整流天线放置在喇叭天线的远场, 对准喇叭天线最大辐射方向, 用电压表测量负载电压。

整流天线的整流效率由式(1)计算^[4]:

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_r} \times 100\% = \frac{V_{DC}^2}{R_L P_r} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为总体整流效率; P_r 为整流天线接收功率; P_{DC} 为直流输出功率; V_{DC} 为直流输出电压; R_L 为负载电阻。

由远场功率传输的傅里斯公式, 有:

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

式中: P_t 为发射天线发射功率; G_t 为发射天线增益; G_r 为接收天线增益; λ_0 为真空波长; R 是位于发射天线远场的整流天线和发射天线间的距离。

改变微波功率源的输出功率, 或者改变发射天线和整流天线间的距离, 从而改变整流天线接收功率。

图6给出了不同负载阻抗下, 天线的整流效率随接收功率变化的实测曲线。当 $R_L=250\Omega$, $P_r=20\text{ dBm}$ 时, 天线的整流效率达到最大值, 为64.0%, 系统输出功率为64 mW; 当 $R_L=200\Omega$, $P_r=20\text{ dBm}$ 时, 整流效率为62.8%, 输出功率为62.8 mW; 当 $R_L=300\Omega$, $P_r=20\text{ dBm}$ 时, 整流效率为63.0%, 输出功率为63 mW。由图6可以看出, 随着接收功率的增大, 二极管工作在非线性区, 电路的整流效率逐渐升高, 在接收功率接近最大允许值时达到最大值; 接收功率继续增大, 系统失配, 整流效率下降, 而且二极管将被击穿。

2 结论

目前, 国内外对于微波输能系统的研究, 重点在于如何提高整流天线的转换效率, 极少关注实际应用中二极管输入端的功率能否保证二极管整流电路转换效率最高, 以及整流电路效率最高时二极管输入端功率量值的大小。本文设计的微带贴片接收整流天线, 接收功率为100 mW时, 转换效率最高(64%), 同传统的单管并联方式相

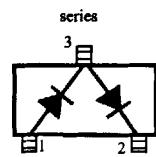


Fig.4 Photo of 286C
图4 286C结构示意图

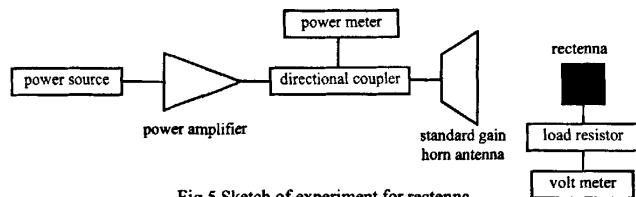


Fig.5 Sketch of experiment for rectenna
图5 整流天线测试系统

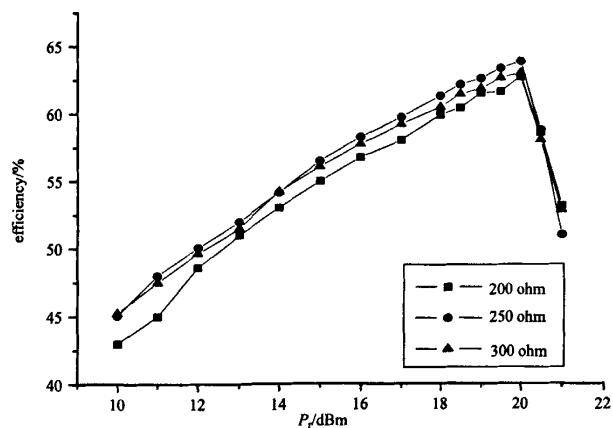


Fig.6 Measured conversion efficiency versus receiving power for various resistive loading
图6 实测不同负载阻抗下, 天线整流效率随接收功率变化曲线

比，大大提高了二极管整流电路的输入功率，整流天线的实际转换效率更高，更具有实际应用价值。

参考文献：

- [1] Dong-Gi Youn,Yang-Ha Park,Kwan-Ho Kim,et al. A study on the fundamental transmission experiment for wireless power transmission system[C]// Proceedings of the IEEE Region 10 Conference. 1999,2:1419–1422.
- [2] Mohammad Ali,Guangli Yang,Roger Dougal. Miniature Circularly Polarized Rectenna With Reduced Out-of-Band harmonics [C]// IEEE Aten.. 2006,5:107–110.
- [3] Jouko Heikkinen,Pekka Salonen,Markku Kivikoski. Planar Rectennas for 2.45 GHz Wireless Power Transfer[C]// IEEE Aten.. 2000,7:102–105.
- [4] James o McSpadden,Taewhan Yoo,Kai Chang. Theoretical and Experimental Investigation of a Rectenna Element for Microwave Power Transmission[J]. IEEE Trans. MTT, 1992,40(12):2359–2366.
- [5] 邓红雷. 一种 5.8 GHz 新颖混合结构的整流天线[J]. 信息与电子工程, 2007,5(5):360–363.
- [6] Mc Spadden,Lu Fan,Kai Chang. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8 GHz Rectenna[J]. IEEE Trans. MTT, 1998,46(12):2053–2059.
- [7] Jouko Heikkinen,Markku Kivikoski. Low-Profile Circularly Polarized Rectifying Antenna for Wireless Power Transmission at 5.8 GHz[J]. IEEE Micro., 2004,14(4):162–164.
- [8] Young-Ho Suh,Kai Chang. A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission[J]. IEEE Trans. MTT, 2002,50(7):1784–1789.
- [9] Berndie Strassner,Kai Chang. 5.8-GHz Circularly Polarized Dual-Rhombic-Loop Traveling-Wave rectifying Antenna for Low Power-Density Wireless Power Transmission Applications[J]. IEEE Trans. MTT, 2003,51(5):1548–1553.

作者简介：



王九灵(1981-)，男，河北省邯郸市人，2005 年毕业于四川大学电子信息科学与技术专业，现为在读硕士研究生，研究方向为微波技术应用。

郭庆功(1967-)，男，新疆伊犁人，副教授，在读博士研究生，主要研究方向为微波技术应用及电磁场数值计算方法。通信作者 E-mail:cqgqg@sina.com。

(上接第 123 页)

- [8] IEEE Std 802.16e-2005. Part16:air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems[S].
- [9] Bolton W,Yang xiao,Guizani M. IEEE802.20:Mobile Broadband Wireless access[J]. IEEE Wireless Communication, 2007, 14(1):84–95.
- [10] 王文博,郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003.
- [11] 田辉. 3GPP 核心网技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007.
- [12] WIMAX Forum. Mobile System Profile,V1.2.0[Z]. 2006.
- [13] 彭木根,王文博. 下一代宽带无线通信系统：OFDM 与 WIMAX[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [14] 董晓鲁. WIMAX 技术、标准与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007.
- [15] IEEE802.20 PD-03. Mobile Broadband Wireless Access Systems: Five Criteria (FINAL)[S]. 2002-11-13.
- [16] IEEE 802.20 PD-02. Mobile Broadband Wireless Access Systems: Approved PAR[S]. 2002-12-11.
- [17] 辛艳,栗欣. 我国及全球 B3G/4G 研究及标准化进展[J]. 移动通信, 2006,30(10):13–17.

作者简介：



鲜其羽(1981-)，男，成都市人，现为在读硕士研究生，主要研究方向为智能系统与设计。E-mail:xianqiyu@gmail.com.

王正勇(1969-)，女，四川省达县人，1994 年四川大学无线电系硕士毕业，在职博士，主要研究方向为实时信号处理分析、图像处理与通信电路系统。

吴小强(1969-)，男，广西融水人，高级工程师，主要研究方向为图像处理、模式识别。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>