

# 一种新颖的 5.8 GHz 圆极化接收整流天线

胡 浩<sup>1,2</sup>, 孔 力<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

**摘 要** 提出了一种新颖的用于微波能量传输的圆极化接收整流天线。截角矩形微带天线作为接收天线, 在工作频率为 5.8 GHz 时得到的轴比为 1.2 dB, 使用肖特基势垒二极管作为整流部分。通过测量接收整流天线的能量转换效率, 证明发射天线和接收整流天线之间的极化未对准对于输出功率和能量转换效率的影响都很小, 所以这种接收整流天线非常适用于移动物体间的微波能量传输。

**关键词** 圆极化; 接收整流天线; 微带天线; 微波能量传输

**中图分类号** TM724.1; TN822.4

**文献标识码** A

**文章编号** 1003-3106(2008)01-0041-03

## A Novel 5.8 GHz Circularly Polarized Rectenna

HU Hao<sup>1,2</sup>, KONG Li<sup>1</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract** This paper presents a novel circularly polarized rectenna designed and measured at 5.8 GHz for application involving microwave power transmission (MPT). A square patch microstrip antenna with truncated corners used for the rectenna is developed. The axial ratio achieved is 1.2 dB at 5.8 GHz. A silicon Schottky barrier diode is employed as the rectifying device. Measured conversion efficiency results of the rectenna prove that the misalignment between transmitting antenna and this circularly polarized rectenna dose not affect the performance of this rectenna, which is suitable to be used in mobile application of MPT system.

**Key words** circularly polarized; rectenna; microstrip antenna; microwave power transmission

### 0 引言

为了解决世界范围内的能源短缺问题, 在 1968 年, Glaser 提出了卫星太阳能电站的设想。该电站用庞大的太阳能电池阵在太空中将太阳能转变为电能, 然后利用微波能量传输技术(MPT)将电能送回地球<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来, 美国、日本和欧洲等国都把这一技术作为解决本国能源短缺的一种重要手段, 进行了大量的研究与试验, 并将微波能量传输技术扩展到微波飞机、空间轨道输电和小功率便携设备供电等应用中<sup>[2]</sup>。

作为 MPT 系统中关键技术之一的接收整流天线的研究, 也得到了很大发展。接收整流天线由接收天线和整流电路构成, 用于将微波能量转换为可用的直流能量。目前, 接收整流天线一般采用微带天线。因为它重量轻、体积小、制造成本低, 非常适合用于微波飞机、空间轨道输电和高空平台等对于天线的质量和体积有严格要求的应用。

一直以来, MPT 设备的工作频率都设计为 2.45 GHz<sup>[3]</sup>, 为了减小天线的面积并增大有效传输

距离, 有人提出 35 GHz 的工作频率方案<sup>[4]</sup>。但是, 35 GHz 的微波发生器非常昂贵并且效率不高, 非常不利于实际应用。综合考虑工作频率对天线面积和器件效率的影响, 5.8 GHz 工作频率接收整流天线, 获得了更多的关注和研究。

### 1 接收整流天线的设计

接收整流天线的核心是整流电路, 有多种可能的实现模型<sup>[5]</sup>, 如桥式和半桥式整流电路等, 但是单个二极管并联整流电路被证明是最实用、最经济的方式。

接收整流天线的基本结构是: 圆极化接收天线之后是输入滤波器, 作用是只让基波通过, 阻止谐波; 然后是接在传输线上的二极管作为整流电路; 再是由微带线和大电容组成的输出滤波器, 其作用是只让直流通过, 阻止基波和谐波通过。这样, 谐波被约束在输入和输出滤波器之间, 以提高二极管的转换效率。电阻接在终端作为负载, 用于测量输出的直流功率。

收稿日期: 2007-05-20

整个接收整流天线电路都采用微带线实现,微带线的介质是聚四氟乙烯玻璃纤维,介质厚度为1.5 mm,介电常数为2.55,导带铜的厚度为0.035 mm,整个电路的布局如图1所示,单位为mm。

下面详细论述天线的具体设计步骤。

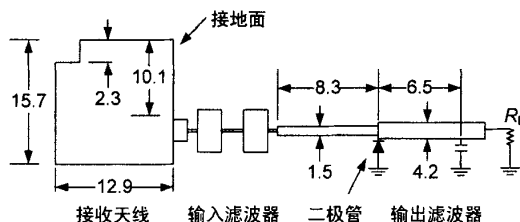


图1 接收整流天线电路结构

### 1.1 圆极化接收天线的设计

根据腔模理论的设计方法<sup>[6]</sup>,设计了一个工作于5.8 GHz频率的圆极化天线。该天线是截角矩形天线,采用边馈方式。根据网络分析仪的测量结果,天线在工作频率点基本达到谐振。

为了与后端的微波电路阻抗匹配,通过调整馈电点,使得天线的输入阻抗为50  $\Omega$ 。馈线的特性阻抗与天线的输入阻抗一致,也为50  $\Omega$ ,对应宽度为4.2 mm,馈线的长度为2 mm。

图2所示是接收天线在工作频率附近的轴比,从图中看出,天线的最小轴比是在5.82 GHz时的0.3 dB,而在工作频率5.8 GHz处的轴比是1.3 dB,3 dB圆极化带宽为100 MHz。

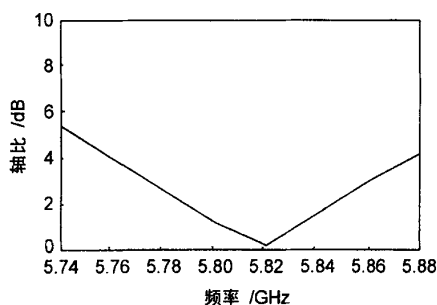


图2 接收天线的轴比

### 1.2 输入滤波器的设计

输入滤波器的作用在于使基波无耗通过,截止谐波,以防止谐波回流到天线。由于在电路中二次以上谐波的幅值已经很小了,它们的影响基本上可以忽略,所以重点考虑的是二次以内的谐波。为此,

设计了一个三阶梯式变阻低通滤波器,如图1中所示,高阻抗和低阻抗微带线得宽度分别是0.3 mm和5.8 mm,长度分别是1.3 mm和3.1 mm。该滤波器传输参数在5.8 GHz和11.6 GHz时分别为-0.3 dB和-17.3 dB,反射参数在5.8 GHz和11.6 GHz时分别为-19.8 dB和-0.5 dB。可见滤波器对于基波的反射系数很低,被反射回的功率很小,而对二次谐波的反射系数很高,有很好的抑制效果。由5.8 GHz时的传输参数可得,引入输入低通滤波器而造成的插入功率衰减约为6%,在可以接受的范围以内。

### 1.3 整流二极管的选择

二极管用来将输入5.8 GHz的微波转换为直流能量和小部分的谐波能量,它是整流电路的核心器件,二极管的参数不仅决定了整个系统设计的尺寸大小,更重要的是它直接决定整个系统的总体转换效率。二极管的型号如果取得不当,不仅造成转换效率低下,而且增加阻抗匹配的难度。

在本设计中,采用单个二极管并联整流电路,选用前向电流大和反向峰值电压高的Agilent HSMS-286B肖特基势垒二极管,二极管的一个引脚跨接在宽为1.5 mm的微带线上,另一个引脚通过孔和接地面连接在一起。二极管的主要参数为:前向电压和最大反向电压分别为0.3 V和7 V。

### 1.4 输出滤波器和匹配电路的设计

输出低通滤波器由一个值为100 pF的条形电容和一段特性阻抗为50  $\Omega$ 的微带线构成。由于电容足够大,可以有效地短路高频能量,让直流通过,而阻止基波和高次谐波通过;另一方面,当二极管截止时,它和输入低通滤波器一起,起着储能的作用,把高次谐波约束在二者中间,以提高二极管的整流效率。具体设计如图1所示。

通过调整二极管和电容间的微带线长度,使得从二极管的输入端看过去,输入阻抗为纯实数,也就是说,使电路发生谐振,以便实现系统的阻抗匹配,减少反射损耗。通过ADS仿真可以得到:当二极管和电容之间得微带线长度是6.5 mm时,电路发生谐振,从二极管看过去的输入阻抗是实数电阻。

输入滤波器和二极管中间是由四分之一波长微带线构成得匹配电路。由于源阻抗和负载阻抗都是实数电阻,因此由四分之一波长微带线进行阻抗匹

配是非常合适的。由于圆极化接收天线的输入阻抗是  $50\ \Omega$ , 经过计算, 选取四分之一波长微带线的特性阻抗为  $90\ \Omega$ , 线宽  $1.5\ \text{mm}$ , 使得源端和负载端达到阻抗匹配。

2 圆极化接收整流天线的测量

在自由空间中测量接收整流天线的能量转换效率等参数, 测量系统如图 3 所示, Hp8673C 相当于信号源, 通过功率放大器, 可以输出最大功率  $43\ \text{dBm}$ , 频率  $5.8\ \text{GHz}$  的微波。通过接在定向耦合器上的功率计, 可以读出功率放大器的输出功率。标准增益喇叭作为发射天线, 在  $5.8\ \text{GHz}$  的工作频率时, 天线的增益是  $16.6\ \text{dBi}$ 。圆极化接收整流天线固定在直线导轨上, 和发射天线的距离可以任意调节。用一个  $300\ \Omega$  的电阻作为接收整流天线的负载。

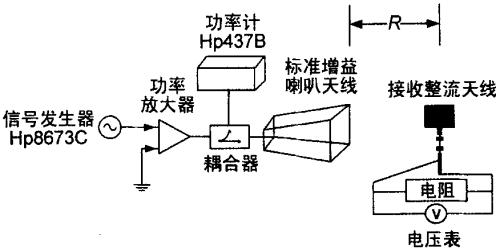


图 3 测量系统的设置

接收整流天线的转换效率表达为：

$$\eta = \frac{V_{DC}^2/R_L}{P_t} \tag{1}$$

式中,  $V_{DC}$  为负载 2 端的直流电压;  $P_t$  是接收整流天线得到的微波能量, 可以通过 Friis 传输公式得到：

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

式中,  $P_t$  为喇叭天线的发射功率;  $G_t$  和  $G_r$  分别为发射天线和接收天线的增益;  $R$  为它们之间的距离;  $\mu$  为极化失配因子。用于计算  $P_r$  的参数值如表 1 所示。

表 1 测量的参数值

$\lambda_0/\text{mm}$	$P_t/\text{dBm}$	$G_t/\text{dBi}$	$G_r/\text{dBi}$	$R_L/\Omega$
51.7	43	16.6	6.3	300

为了验证接收整流天线的圆极化特性, 将发射天线和接收天线的极化椭圆长轴之间的夹角取不同值时 ( $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) 进行测量。值得注意的是, 在不同的夹角  $\alpha$  时, 极化失配因子  $\mu$  是不同的。它们之间的关系为：

$$\mu = \frac{1}{2} + \frac{v^2 - 1}{2(v^2 + 1)} \cos 2\alpha$$

式中,  $v$  为接收天线在  $5.8\ \text{GHz}$  频率时的轴比。

在不同的夹角  $\alpha$  时, 通过调节距离  $R$  得到了相应的最大能量转换效率  $\eta_{\max}$ , 测量值如表 2 所示。可以看出, 在不同的放置角度时, 最大能量转换效率和输出功率差别不大, 也就是说, 由于极化失配而产生的额外能量衰减很小, 充分显示了圆极化接收整流天线的优点。

表 2 接收整流天线测量结果

$\alpha$	$P_r/\text{mW}$	$V_{DC}/\text{V}$	$\eta_{\max}$
$0^\circ$	15.0	1.66	61.2%
$45^\circ$	14.8	1.60	57.5%
$90^\circ$	14.9	1.58	55.6%

3 结束语

设计了一种新颖的  $5.8\ \text{GHz}$  圆极化接收整流天线。测量结果证明, 发射天线和接收整流天线之间的极化未对准对于接收整流天线的输出功率和能量转换效率的影响都很小。因此, 这种接收整流天线适用于移动物体之间的微波能量传输。

参考文献

[1] GLASER P. Power From the Sun; Its Future [J]. Science, 1968, 162(11): 857 - 861.

[2] BROWN W. Status of the Microwave Power Transmission Components for the Solar Power Satellite [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981, 29(12): 1319 - 1327.

[3] RONALD J, GUTMANN, BORREGO J. Power Combining in an Array of Microwave Power Rectifiers [J]. Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1979, 27(12): 958 - 968.

[4] KOERT P, CHA J, MACHINA M. 35 and 94 GHz Rectifying Antenna Systems [C]. SPS 91-Power from Space, 1991: 541 - 547.

[5] BROWN W. Optimization of the Efficiency and Other Properties of the Rectenna Element [J]. Microwave Symposium International, 1976, 76(1): 142 - 144.

[6] CARVER T, JAMES W. Microstrip Antenna Technology [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 29(1): 2 - 24.

作者简介

胡 浩 男, (1981 - ), 中国科学院电工研究所硕士生。主要研究方向: 微波能量传输和接收整流天线技术。

## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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](http://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>