

微波输能中一款 S 波段整流天线阵列研究<sup>①</sup>张彪<sup>1</sup>, 侯欣宾<sup>2</sup>, 郁成阳<sup>1</sup>, 刘长军<sup>1</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 中国空间技术研究院空间新系统研发室, 北京 10094)

**摘要:**微波无线能量传输是空间无线能量传输的一种途径,微波整流天线阵列作为微波无线能量传输系统的重要组成部分,得到了迅速发展和研究。文章在 2.45GHz 频段分别设计了微带偶极子接收天线和高效微带整流电路,并组成 50cm×50cm 的微波整流天线阵列。阵列由 72 个整流天线单元组成,每个整流天线单元包括一个偶极子天线和一个整流电路。实验测试得到 37.1% 的整体传输效率。

**关键词:**微波无线能量传输;微波整流天线;微波整流电路

**DOI:**10.3969/j.issn.1674-7135.2013.03.010

## 0 微波无线能量传输

微波无线能量传输(MPT)是空间太阳能发电卫星(Solar Power Satellites, SPS)的重要组成部分,旨在将空间中的太阳能转换成微波能量传回地球,由地面整流天线阵列接收整流后输出直流能量以供人们使用<sup>[1,2]</sup>。微波能量除了可以从空间传回地球,同样可以在空间飞行器之间进行能量的无线传输,例如在可重构分布式卫星中获得应用。

微波无线输能系统包括五部分,分别是:微波源、发射天线、接收天线、整流电路和直流负载。微波无线输能可以实现能量的定向、远距离、高效传输。提高微波无线输能系统的效率和功率容量是研究的关键问题。

系统组成框图如图 1 所示,微波源产生的微波能量通过发射天线进入自由空间,接收天线将捕捉到的微波能量通过整流电路整流后转换为直流能量,输送至直流负载。整流天线由接收天线和整流电路组成,图 1 中,整流天线是微波无线输能系统中的重要组成部分,是微波能量接收和转换的关键,对系统的整体传输效率具有决定性影响。



图 1 微波无线输能系统框图

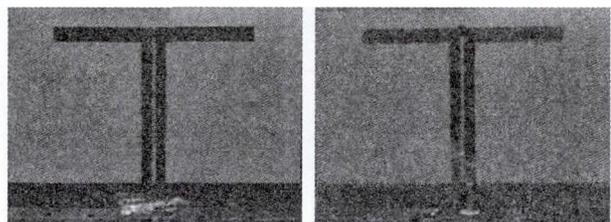
## 1 S 波段 2.45GHz 微波整流天线设计

2.45GHz 是 ISM 保留频率,选择此频率来设计整流天线,一方面,微波整流电路 2.45GHz 得到了迅速发展,另一方面,2.45GHz 作为公用频率,具有良好的应用前景。

偶极子天线是一种典型的线极化天线,对于采用线极化喇叭天线作为发射天线的微波输能系统而言,线极化接收天线具有更好的接收效果,因此,采用偶极子天线作为接收天线。

## 1.1 微带偶极子天线

微带偶极子天线<sup>[3]</sup>实际加工采用的是介电常数 4.4,厚度 1mm,损耗角正切 0.025 的 FR-4 双面敷铜介质板。这种板材机械强度好,价格低廉,符合阵列天线的需求。图 2 为天线的实物图,为了增加天线的增益,在天线底部增加了金属反射板,不仅提升了天线的增益,还增强了天线的定向性,同时由于金属板的反射,也避免了微波对天线之后的整流电路的影响。



(a) 正面

(b) 背面

图 2 微带偶极子天线照片

① 收稿日期:2013-05-24;修回日期:2013-07-20

图3为天线的仿真和实测  $S_{11}$  曲线,从图3中可以看出,实测和仿真的曲线基本一致。在2.45GHz时,实测  $S_{11}$  参数达到了-22dB。天线的绝对带宽为600MHz,相对带宽为25%,满足整流天线的设计要求。

天线的实测方向图如图4所示,其中,图4(a)为E面方向图,图4(b)为H面方向图。实际测试时分别测试了天线在2.45GHz和2.5GHz的方向图,从测试结果可知,在所工作频带内,天线的方向图具有一致性。天线在2.45GHz的实际增益为5.2dBi。

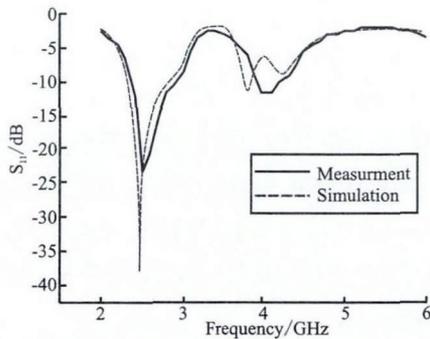
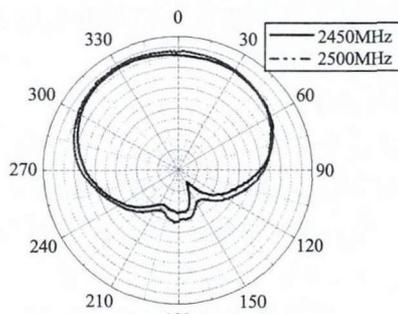
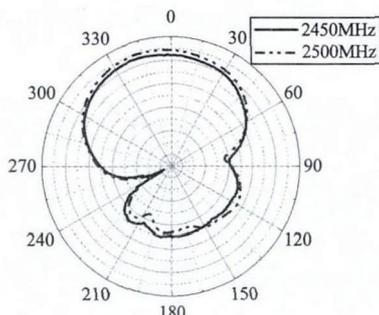


图3 天线仿真和实测  $S_{11}$



(a) E面方向图



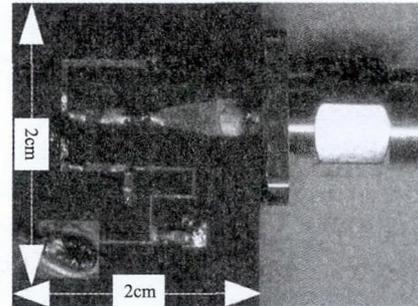
(b) H面方向图

图4 天线E面(a)和H面(b)实测方向图

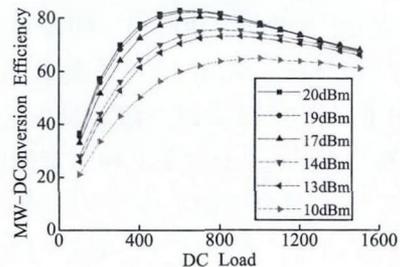
## 1.2 45GHz 高效微带整流电路

整流电路设计选取 Avago 公司的 HSMS-282C

作为整流二极管,具体参数为:  $V_{BR} = 15 \text{ V}$ ,  $C_p = 0.7 \text{ pF}$ ,  $R_s = 6 \Omega$ 。电路板实物图如图5(a)所示,加工采用的介质基板为 F4B-2 聚四氟乙烯玻璃纤维双面覆铜板。基板厚度 1mm,介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ ,损耗角正切值为 0.002,表面覆盖的铜板厚度为  $18 \mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>。



(a) 实物图



(b) 效率曲线

图5 整流电路实物图(a)及实测效率曲线(b)

图5(b)给出了当输入微波功率为 10dBm ~ 20dBm,负载为  $100 \Omega \sim 1500 \Omega$  时的整流效率的测量结果。当输入功率在 13dBm ~ 20dBm 之内,负载在  $600 \Omega \sim 1200 \Omega$  之间时,均获得了大于 70% 的整流效率;当输入功率为 17dBm ~ 20dBm 之间,负载为  $500 \Omega \sim 800 \Omega$  时,整流效率均大于 80%,最高整流效率达到了 83.07%,此时的输入功率为 20dBm,负载为  $600 \Omega$ 。由图中还可以看出,当输入功率变小时,整体效率开始下降,且效率最高时的最佳负载值在增大。这是因为二极管最佳工作电压一致,当输入功率减小时,只有负载增大才能保证二极管处于最佳工作电压。整流电路在较宽的功率范围均具有高的整流效率,保证了位于阵列中心和阵列边缘的整流天线单元均正常高效的工作。

## 1.3 整流天线阵列

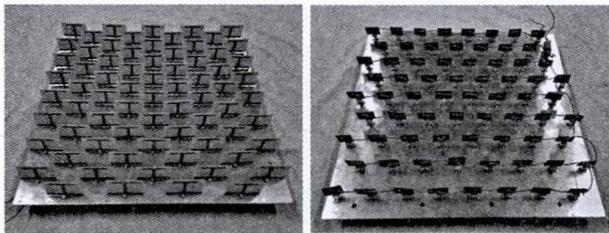
天线的等效口径面积为:

$$A_{er} = \frac{G_r \times \lambda^2}{4\pi} \quad (1)$$

天线增益为 5.2dBi,口径面为圆形,则口径面半

径为  $0.29\lambda$ 。为了保证相邻接收天线的口径面重叠部分最小,又使接收天线口径面能够将整个阵列面均匀覆盖,整流天线阵列按照等边三角形排列,根据偶极子天线阵列理论<sup>[5]</sup>和口径面半径,阵列中相邻两个天线之间的距离为  $\lambda/2$ 。

天线实物如图 6 所示,每一个整流天线单元中,接收天线均通过 SMA 接头与整流电路连接。天线阵列由  $8 \times 9$  个整流天线单元组成,所有整流电路并联输出直流能量,面积为  $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 。



(a) 正面视图 (b) 背面视图

图 6 整流天线阵列实物图

## 2 测试结果及分析

天线的远场距离为:

$$R = \frac{2L^2}{\lambda} \quad (2)^{[5]}$$

式(2)可知,发射天线的远场距离为  $2.49\text{m}$ 。因为发射端的功率源输出功率有限,为了确保远场条件成立,同时又兼顾接收天线处的功率密度,测试时选取了距离  $d$  为  $2.75\text{m}$  和  $2.55\text{m}$  分别进行测试。在距离  $d$  处,接收天线口径面处的功率密度为:

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (3)$$

其中,  $P_t$  为发射功率,  $G_t$  为发射天线增益,  $d$  为发射天线与接收天线之间的距离。

整流天线阵的效率为:

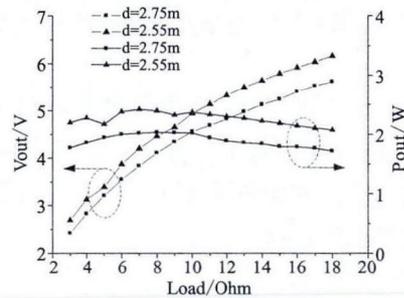
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_r} \times 100\% = \frac{V_{out}^2 / R_{Load}}{P_t G_t / 4\pi d^2 \times A_{rectenna-array}} \quad (4)$$

其中,  $V_{out}$  为直流输出电压,  $R_{Load}$  为直流负载,  $A_{rectenna-array}$  为整流天线阵面积。

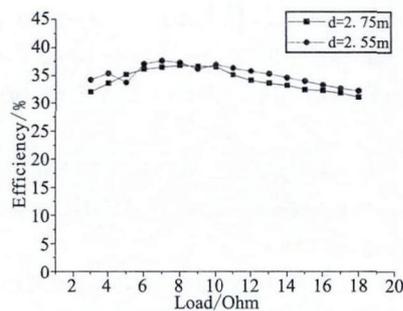
天线测试中,标准增益喇叭发射天线的增益  $G_t$  为  $16\text{dBi}$ ,微波功率源的最大输出为  $52\text{W}$ 。当距离为  $2.75\text{m}$  时,  $P_d$  为  $22.12\text{W}/\text{m}^2$ ; 距离为  $2.55\text{m}$  时,  $P_d$  为  $25.72\text{W}/\text{m}^2$ 。

图 7(a) 为整流天线阵列在不同距离下直流电压和功率随负载的变化曲线。电压随着负载的增加

而增加,直流输出功率基本稳定在  $2\text{W}$  附近,最高为  $2.42\text{W}$ ,此时距离为  $2.55\text{m}$ ,负载为  $7\Omega$ 。由于整流电路的最佳负载在  $500\Omega \sim 800\Omega$  之间,72 个单元并联后,最佳负载为  $7\Omega \sim 11\Omega$  之间,与实际测试结果吻合。



(a) 直流输出电压与功率随负载的变化曲线



(b) 整流效率随负载的变化曲线

图 7 天线测试曲线图

图 7(b) 为整流天线阵列的整体效率曲线图,由图可知,效率均大于  $30\%$ ,最高为  $37.1\%$ ,整流效率在负载变化时基本保持稳定。在距离较近时,由于整流天线上功率密度较大,天线能够接收更多地微波能量,整流效率整体高于距离较远时的情况。

测试系统的功率源输出功率有限,为了保障整流电路正常工作,发射天线和接收天线之间的距离较近。近距离测试会导致整流天线阵列中心和外围的功率密度分布不均匀,到达接收天线口径面外围的实际功率小于理论计算值,因此理论计算的整流效率会小于实际效率。同时,功率密度分布不均也导致了整流天线阵列外围和中心的整流电路工作状态不同。中心区域的整流天线接收的功率高于外围整流天线,因此,从图 5(b) 中可以看出,中心区域电路的输出电压和整流效率高于外围电路,当输出全部并联时,电压的不均衡也导致整体效率下降。

### 3 结论

微波无线能量传输是空间技术的一个新领域,发展迅速。文章将微波无线输能中的关键部件,微波整流天线阵列作为研究对象,分析了整流天线的效率,并设计了一款 2.45GHz 微波整流天线阵列,实测达到了 37.1% 的整体效率,最高输出直流功率 2.42W。

在下一步的研究中,着重研究影响整流天线效率的因素,提升整流效率。为了达到实际应用水平,提升整流天线阵列的功率容量<sup>[6,7]</sup>和直流能量输出也是研究的重要方向。

### 参考文献:

- [1] William C Brown. The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Sept. 1984, Vol. MIT-32, NO. 9: 1230-1242.
- [2] Rakesh Kumar Yadav, Yadava R L, Sushrut Das. The rectennas- a progressive study[J]. IJSTM, July, 2011, Vol. 2 Issue3:119-126.
- [3] 李秀萍,刘禹,曹海鹰. 基于 RFID 应用的小型化印刷偶极子天线设计[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(5):75-78.
- [4] 张彪,刘长军,黄卡玛. 一种小型化的 2.45GHz 高效微波整流电路设计与实现[C]. 2011 年全国微波毫米波会议论文集(下册),1693-1696.
- [5] Jhon D Kraus, Ronald J Marhefka. 天线[M]. 第三版. 北京:电子工业出版社,39-40,529-548.
- [6] 张彪,刘长军. 一种高效的 2.45GHz 二极管阵列微波整流电路[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9):2443-2446.
- [7] Zhang Biao, Zhao Xiang, Yu Chengyang, Huang Kama, Liu Changjun. A power enhanced high efficiency 2.45GHz rectifier based on diode array[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, 25: 765-744.

### 作者简介:

张彪 1987 年出生,四川大学在读博士生,主要研究方向为微波无线输能和微波电路。

侯欣宾 1973 年出生,博士、研究员,主要从事科学卫星总体技术、空间能源技术方面的研究。

郁成阳 1988 年出生,四川大学在读博士生,主要研究方向为微波无线输能和微波电路。

刘长军 1973 年出生,教授,博士生导师,主要从事电磁场与微波技术方面的研究工作。

## Study on an S-Band Microwave Rectenna Array in Microwave Power Transmission

ZHANG Biao<sup>1</sup>, HOU Xin-bin<sup>2</sup>, YU Cheng-yang<sup>1</sup>, LIU Chang-jun<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The microwave power transmission is an approach to wireless power transmission in space. As an important part of a microwave wireless power transmission system, microwave rectenna arrays have been widely studied. A microstrip dipole antennas and a microwave rectifier with high conversion efficiency were designed at 2.45GHz, and a rectenna array with the area of 50cm by 50cm was built. The array is composed of 72 rectenna units, and each unit consists of a dipole antenna and a rectifier circuit. The experimental results show that the highest microwave power transmission efficiency reaches 37.1%.

**Key words:** Microwave power transmission (MPT), Microwave rectenna array, Microwave rectifier