

董士伟¹ 王颖¹ 董亚洲¹ 付文丽¹ 李小军¹

多界面匹配高效微波整流天线设计方法

摘要

整流天线效率对远距离微波能量传输的整体效率至关重要.针对传输系统接收整流端效率提升的需求,提出了一种多界面匹配高效微波整流天线的设计方法.首先对整流天线的效率给出了数学描述,并据此在能量波束入射界面、能量转移界面、能量转换界面、直流合成界面提出了匹配原理和方法.多界面匹配联合就形成了高效整流天线设计方法.最后,根据相关匹配原理进行了实验验证,证实了对波阻抗匹配和输入阻抗匹配的分析.

关键词

微波无线能量传输;整流天线;效率;匹配

中图分类号 TN011.2;TM615

文献标志码 A

收稿日期 2016-11-21

资助项目 装备预研基金(9140A20090314HT05310)

作者简介

董士伟,男,博士,研究方向为空间微波技术与系统.sw.dong@163.com

0 引言

远距离的电力传输往往是通过高压电缆实现的,这种传输方式一方面需要完备的基础设施的支持,另一方面也将电力传输路径限定在电缆网络中.特斯拉最早提出无线能量传输时设想的是通过低频电磁波发射,并可实现全球接收的系统^[1],从而摆脱了电缆的限制. Brown 等^[2]采用微波能量波束为小型直升机供电的试验是真正迈向远距离无线能量传输的标志.而自 Glaser^[3]提出空间太阳能电站的概念以来,微波无线能量传输技术在能源领域和电子工程领域的交叉子域茁壮发展起来^[4-6].

在微波能量传输系统中,能量将经过多次转换和传播,所以整体效率受到很大限制.整个效率链上主要的元素是直流-微波转换效率、波束截获效率和整流效率,提升整体效率也往往从这3个元素着手.专家和学者们已经针对高效微波功率源、高精度指向控制、高效整流天线等技术开展了深入的研究,但距离国际无线电科学联合会的《太阳能发电卫星》所期望的50%整体效率尚存在巨大差距^[7].

微波整流天线是主要完成微波能量接收和微波-直流能量转换的装置,其效率对微波能量传输整体效率至关重要.最近的研究获得了42%的整流天线效率,在接收、整流环节都有较大的能量损失^[8].为了解决上述问题,本文基于肖特基二极管整流提出了多界面匹配高效整流天线的概念,讨论了多界面匹配理论,提出了多界面匹配提高效率的方法,从而形成了整流天线设计方法,给出了仿真、试验结果.

1 数学描述

为了满足微波能量传输高截获效率的需要,整流天线口径一般是电大尺寸的.而目前肖特基二极管功率容量尽在数十毫瓦量级,所以基于肖特基二极管整流的微波整流天线往往采用阵列的形式.整流天线口面由大量模块组装而成,而每个模块内部又包含大量整流单元.为了简化设计,本文主要以模块为基准展开讨论.

基于肖特基二极管整流的微波整流天线对能量流的处理可分为3段:微波能量接收、微波-直流能量转换、直流能量合成,其总效率 η_R 可写为

$$\eta_R = \eta_A \cdot \eta_{cv} \cdot \eta_{cb}, \quad (1)$$

式中, η_A 是整流天线的能量吸收效率, η_{cv} 是微波-直流能量转换效率,

1 中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室,西安,710110

η_{cb} 是直流能量合成效率.

假设入射到整流天线表面的总微波功率为 P_R , 而吸收到整流电路的功率为 P_A , 则吸收效率可表示为

$$\eta_A = P_A/P_R. \quad (2)$$

在此环节损失的能量主要因整流天线的反射引起.

微波-直流能量转换效率取决于两点,其一是在整个整流天线口面上整流天线单元要匹配其所处位置的微波功率密度;其二是在整流天线模块内部,整流电路的阻抗要匹配肖特基二极管的输入阻抗.微波-直流能量转换效率 η_{cv} 可表示为

$$\eta_{cv} = P_{DC-i}/P_A = \sum P_{DC-i}/\sum P_{RF-i}, \quad (3)$$

其中 P_{RF-i} 是每个整流模块或单元吸收的微波功率, $P_A = \sum P_{RF-i}$, P_{DC-i} 是每个整流模块或单元输出的直流功率, P_{DC-i} 是所有整流模块输出的直流功率之和, $P_{DC-i} = \sum P_{DC-i}$.

因为在整流天线口面上微波入射功率密度是非均匀的,所以每个整流天线模块甚至整流电路单元输出的直流功率也是非均匀的,在直流功率合成时这种非均匀也会导致合成效率降低.直流能量合成效率 η_{cb} 可表示为

$$\eta_{cb} = P_{DC}/P_{DC-i} = P_{DC}/\sum P_{DC-i}. \quad (4)$$

多界面匹配就是在上述能量流处理的各个界面上保证参数匹配,从而提升整流天线的总效率.

2 波阻抗匹配

波阻抗匹配发生在空气和整流天线口面的界面上,微波能量波束在空气中传播的波阻抗如果与进入整流天线口面后的波阻抗不匹配,就会造成波的反射,导致能量损失和能量吸收效率的降低.这里将整流天线口面视为一种介质,并采用人工完美匹配层理论阐述这一问题.

完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML) 可以实现任意频率、任意极化、任意角度入射波的无损吸收,但因为不存在本构张量的严格数学形式,所以物理上实现 PML 是不可能的.然而当波的入射角很小时,可以修正单轴完美匹配层的介质参数,同时借助人工介质调控介电常数和磁导率的能力,实现 PML 数学定义的本构关系,从而满足人工 PML 与空气介质的匹配(图 1).

在笛卡尔坐标系中,假定波以与 Z 轴成 θ 角的

方向入射到平行于 XY 面的厚度为 L 的人工 PML 上,人工 PML 的等效介电常数和等效磁导率为 $\epsilon_r = \mu_r = \text{diag}(\alpha, \alpha, h)$, 用分量 h 代替了理想 PML 的 $1/\alpha$ 分量,这样就可以用无源结构实现高效的吸收.人工 PML 对能量波束的吸收能力可以用 S 参数表征^[9]:

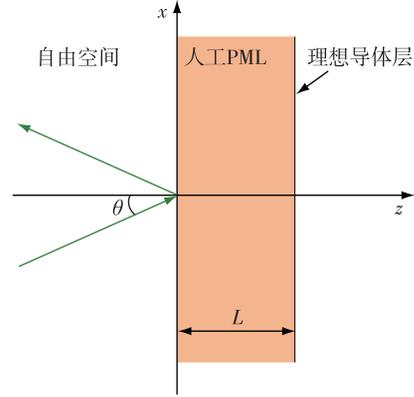


图 1 能量波束入射到人工完美匹配层
Fig. 1 Power beam illuminating the artificial PML

$$S_{11} = \frac{-k_z \cos(k_z L) - \mu_{rx} k_0 \cos \theta \sin(k_z L) i}{k_z \cos(k_z L) - \mu_{rx} k_0 \cos \theta \sin(k_z L) i} \times e^{-2ik_0 \cos \theta L}, \quad (5)$$

其中 $k_z = k_0 \sqrt{\epsilon_{ry} \mu_{rx} - \mu_{rx} \sin^2 \theta / \mu_{rz}}$ 为透射波矢的 z 向分量,且 $\epsilon_{ry} = \mu_{rx} = \alpha, \mu_{rz} = h$.

由式(5)可知,当入射角很小时, h 对 S_{11} 的影响甚微.如果可以认为 $\cos \theta = 1$, 并定义复数 $\alpha = \alpha' + i\alpha''$, 则整流天线的能量吸收效率可简化为

$$\eta_A = 1 - |S_{11}|^2 = 1 - \frac{1}{e^{4\alpha'' k_0 L}}. \quad (6)$$

尽管式(6)中能量吸收效率与 α' 没有直接关系,但为了获得更多设计信息,还是可以通过 α'' 和 $|\alpha'|$ 的比例关系将其考虑到影响因素中.如图 2 所示为人工 PML 厚度为 $L = \lambda/60$ 时能量吸收效率的曲线.可见 α'' 和 $|\alpha'|$ 的比值越大, $|\alpha'|$ 越小,就越容易获得高的能量吸收效率;满足 $\alpha'' \geq 11$ 时,一般能量吸收效率就能达到 99% 以上.

接下来的工作就是用人工媒质实现上述完美匹配层的参数要求,已经提出一种用亚波长周期结构实现人工 PML 的方法,这里需要注意的是要将肖特基二极管的输入阻抗的效应加载到亚波长单元上^[10].

3 功率密度匹配

功率密度匹配发生在微波能量从吸收表面向整流电路转移的界面上.在整流天线口面上,微波功率

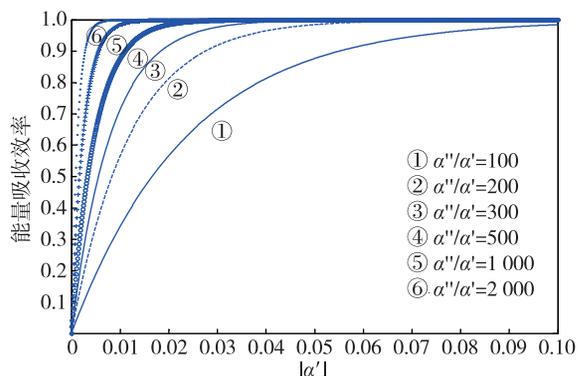


图2 $L=\lambda/60$ 时能量吸收效率与介质参数的关系

Fig. 2 Energy absorption efficiency versus medium parameters with $L=\lambda/60$

密度往往呈现出高斯分布,在保证较高波束截获效率的情况下,整流天线中心和边缘的功率密度差异可达 30 dB.用于整流的肖特基二极管有一个重要的特性,就是在不同的输入功率下会表现出不同的效率;同时,不同的肖特基二极管也会表现出不同的功率容量.这就要求在设计整流天线时要匹配口面上的功率密度,对整流电路进行差异化设计.

如图 3a 所示为整流天线口面上的功率密度分布和整流天线模块分布,出于整流天线设计方案的简化考虑以及器件种类的限制,整流天线常常采用模块化设计思想,在单个模块范围内,认为功率密度是均匀的.整流电路的差异化设计就体现在模块和模块之间.如图 3b 所示为功率密度匹配方法示意,整流天线模块根据到中心的距离分为 4 个功率密度等级,即共有 4 类模块设计.各整流模块的设计依据

就是其所处位置的平均功率密度,根据各模块到功率密度中心的距离 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 ,以及能量传输距离,可以在 $u-v$ 坐标系下确定模块处的功率密度.

经过功率密度匹配设计,就确定了各模块内整流电路阵列的输入条件,理论上满足了获得最佳整流效率的要求.

4 输入阻抗匹配

输入阻抗匹配发生在整流器件处微波能量发生转换的界面上.模块内部优化的目标就是获得尽量高的整流效率 $P_{DC,i}/P_{RF,i}$.关于高效整流电路的设计已经有过深入的讨论^[11],但在实际系统中并不是整流电路高效工作的条件都能得到满足,比如整流电路输入功率是随接收口面上的功率密度连续变化的,而现有器件功率容量未必与之完全匹配,这样就不能保证全部整流天线模块都工作在理想状态.

如上所述,用于整流的肖特基二极管在不同的输入功率下会表现出不同的效率.解决器件特性失配问题的途径首先是选择不同的器件,并结合其功率容量设计;其次是对同一器件做差异化设计.前者显而易见,这里重点阐述后者.

以 HSMS-2820 为例进行分析,首先给出理想匹配下整流电路的特性,即按照最佳功率输入 26 dBm 时器件输入阻抗进行匹配的整流效率,如图 4 中实线所示.然后给出实际匹配下整流电路特性,即按照第 3 节得到功率输入(假设为 22 dBm)时器件输入阻抗进行匹配的整流效率,如图 4 中虚线所示.可以看到:理想匹配下最高效率略高于实际匹配下的最

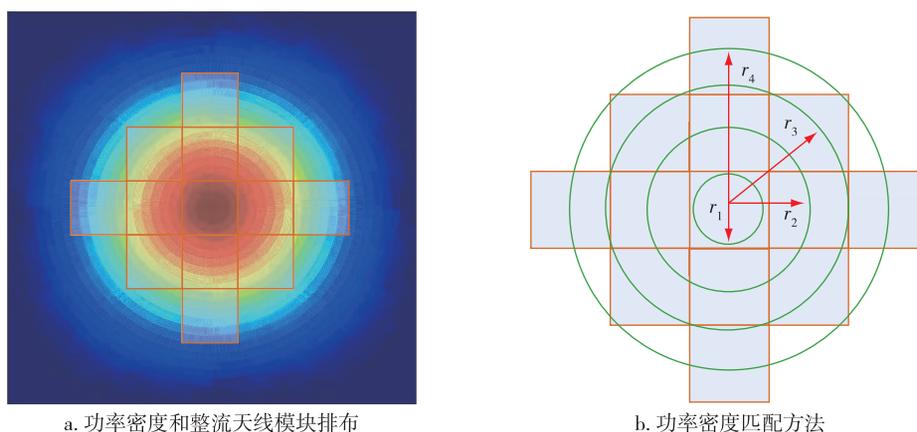


图3 整流天线功率密度匹配设计

Fig. 3 Rectenna design based on power density matching, (a) power density and rectenna modules arrangement; (b) method for power density matching

高效率,且都发生在 26 dBm 输入条件下;但在 22 dBm 输入下,实际匹配的整流效率达到 70.8%,而理想匹配的整流效率只有 63.5%。这样的结果说明整流电路与器件输入阻抗的失配是影响整流效率的关键,而这也为整流天线各模块中整流电路设计提供了思路。

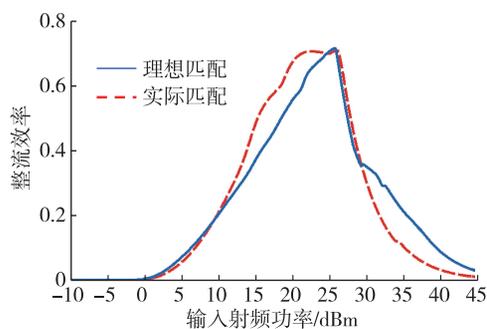


图4 整流器件输入阻抗匹配设计

Fig. 4 Input impedance matching design of the rectifying device

5 直流功率均衡匹配

直流功率均衡匹配发生在整流电路输出端直流功率合成的界面上。由式(3)可知获得尽量高的总直流功率 $\sum P_{DC,i}$ 是优化微波-直流能量转换效率的目标。而在整流天线口面上射频功率分布是非均匀的,那么各整流天线模块输出的直流功率也按等级分为几类,如同第3节讨论的一样。这些整流天线模块进行直流输出合成时,直流功率不均衡将导致合成效率降低。

文献[12]已经提出了实现直流功率均衡匹配的顶层设计思想,是一种基于径向剖分的均衡匹配方法。在应用系统中,整流天线口径往往远大于模块尺寸,这种单一的剖分方法导致直流功率合成网络非常复杂。优化的均衡匹配方法是基于径向和周向复合剖分的,其原理如图5所示。

6 实验及分析

本文研制了基于人工完美匹配层的整流天线模块,搭建了固态相控阵体制微波能量传输试验系统,如图6所示。因为只研制了一个整流天线模块,所以只能验证能量吸收表面的低反射性能。根据表1所列测试结果,结合整流电路的效率,能量吸收表面的吸收效率约为 82.5%~96.2%。

试验结果表明:在较远的距离和较低功率密度下可以得到更高的效率。这似乎与整流电路的效率

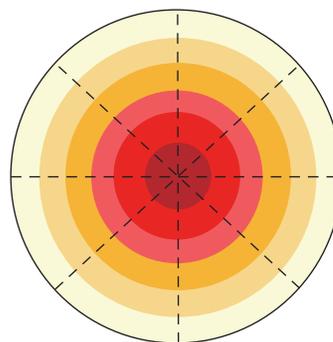


图5 径向和周向复合剖分直流功率均衡匹配原理

Fig. 5 Balanced DC power matching based on radial and angular subdivision



图6 微波能量传输试验系统

Fig. 6 Setup of microwave power transmission experiment

表1 微波能量传输试验测试结果

Table 1 Results of microwave power transmission experiment

传输距离 /m	整流模块中心功率密度 / (mW/cm ²)	整流电路输出电压/V	整流模块整体效率/%
1.24	23.02	3.21	40.66
1.70	14.90	2.90	51.28
2.00	12.33	2.80	57.74

特性相违,其根本原因是在较远距离上整流天线模块内功率密度更为均匀,也定性地说说明微波整流电路设计中输入阻抗匹配的重要性。

7 结论

本文围绕微波无线能量传输系统的接收整流端效率提升的需求,提出了一种多界面匹配高效微波整流天线的设计方法。通过对各界面的匹配问题的

深入探讨,给出了有针对性的技术途径,有效地保证了整流天线的整体效率.通过微波功率传输试验对部分界面匹配的效果进行了验证,表明多界面匹配高效微波整流天线设计方法是有效的.

参考文献

References

- [1] Budimir D, Marincic A. Research activities and future trends of microwave wireless power transmission [C] // Sixth International Symposium Nikola Tesla, 2006
- [2] Brown W C, Eves E E. Beamed microwave power transmission and its application to space [J]. IEEE Transactions Microwave Theory Technology, 1992, 40 (6): 1239-1250
- [3] Glaser P E. Power from the sun: Its future [J]. Science, 1968, 162(3856): 857-861
- [4] Strassner II B, Chang K. Microwave power transmission: Historical milestones and system components [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1379-1396
- [5] Sasaki S, Tanaka K, Maki K. Microwave power transmission for solar power satellites [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1438-1447
- [6] Carvalho N B, Georgiadis A, Costanzo A, et al. Wireless power transmission: R&D activities within Europe [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2014, 62(4): 1031-1042
- [7] URSI Inter-Commission Working Group on SPS. URSI white paper on Solar Power Satellite (SPS) [R]. 2006
- [8] Mihara S, Sato M, Nakamura S, et al. The result of ground experiment of microwave power transmission [C] // Proceedings of 66th International Astronautical Congress, 2015 (in press)
- [9] Ye D X, Wang Z, Wang Z Y, et al. Towards experimental perfectly-matched layers with ultra-thin metamaterial surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60(11): 5164-5171
- [10] Wang R, Ye D X, Dong S W, et al. Optimal matched rectifying surfaces for space solar power satellite applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2014, 62(4): 1080-1089
- [11] Mcspadden J O, Fan L, Chang K. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8 GHz rectenna [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1999, 46(12): 2053-2060
- [12] Dong S W, Ma W. Optimization of Balanced rectenna for high efficiency microwave power transmission [C] // Proceedings of 58th International Astronautical Congress, 2007

Design of highly efficient microwave rectenna based on multi-interface matching

DONG Shiwei¹ WANG Ying¹ DONG Yazhou¹ FU Wenli¹ LI Xiaojun¹

¹ National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100

Abstract Efficiency of rectenna is crucial to overall efficiency of far distance microwave power transmission. The mathematical description for rectenna efficiency is presented in this paper, and then the matching principles and methods are investigated on multiple interfaces of power beam incident, power transfer, power conversion and DC power combining. A design concept is developed based on multi-interface matching. Experiment is conducted with respect to the proposed matching principles, which verifies the analysis on wave impedance matching and input impedance matching.

Key words microwave power transmission; rectenna; efficiency; matching