

DOI: 10.11991/yykj.201602001

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20160722.1000.026.html>

一种基于子阵分解的高效整流天线阵列

张鹤馨, 刘长军

四川大学 电子信息学院 四川 成都 610064

摘 要: 针对微波无线能量传输系统中接收端功率密度非均匀分布, 提出了一种高效的子阵分解微波整流天线。通过研究接收天线阵列功率密度分布规律, 设计了针对不同最佳功率点的整流电路。在微波整流电路功率动态范围有限的情况下, 采用子阵分解微波整流天线设计, 可以拓展微波整流功率范围, 提高系统效率。实验结果表明, 针对微波输出功率从 $-5 \sim 22$ dBm 的类高斯分布接收阵列天线, 采用最佳工作点为 21、17 和 10 dBm 的 3 种微波整流电路, 通过基于子阵分解进行优化排布, 使整流天线的整体效率提高 10% 以上。

关键词: 微波无线能量传输; 整流天线; 功率密度分布; 整流效率; 阵列天线

中图分类号: TN455

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2016) 04-057-05

A high-efficiency microwave rectenna array based on subarray decomposition

ZHANG Hexin, LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: The receiving power density is non-uniformly distributed in a microwave wireless power transmission (MPT) system. A high-efficiency microwave rectenna based on subarray decomposition is proposed in this paper. Through study of the power density distribution on receiving antenna array, the corresponding rectifiers at three power levels were designed and fabricated. The rectifying efficiency was reduced in a microwave power transmission system as a result of limited power range of a microwave rectifier. Microwave rectennas based on subarray decomposition extend the range and improve the system efficiency. Experiments show that as for the Gauss like distributed receiving array antenna whose microwave output power ranges from -5 dBm to 22 dBm, three kinds of rectifiers, whose optimal points of power are 21 dBm, 17 dBm and 10 dBm, respectively, have improved the total efficiency more than 10% by a subarray decomposition rectenna.

Keywords: microwave wireless power transmission; rectenna; power density distribution; rectification efficiency; array antenna

随着社会的发展, 能源和环境问题成为全世界亟待解决的巨大挑战。20 世纪 60 年代初, 美国人 W.C. Brown 提出了微波无线能量传输 (MPT) 的概念, 以微波为载体在自由空间传输能量。1968 年美国科学家 P. Glaser 提出了空间太阳能电站概念, 从地球同步轨道的太阳能卫星把接收到的太阳能转换为电能, 用大功率微波天线定向发射回地面, 地面整流天线将接收到的微波转换为直流电, 从而实现对

空间太阳能的利用^[1-4]。

微波无线能量传输技术是空间太阳能电站的关键技术之一^[5]。整流天线是系统的重要组成部分, 直接影响微波无线能量传输系统效率。整流天线效率包括接收天线效率和整流效率^[6-7]。整流效率受电路的设计、二极管选择、频段偏移、输入功率等因素影响^[8-9]。

在微波无线能量传输系统中, 接收天线口径大, 接收面上功率分布不均匀。微波整流电路通常动态范围有限, 不能满足接收天线功率大动态范围的要求。因此, 文中提出基于子阵分解的微波整流天线设计, 提高微波无线能量传输系统效率。

收稿日期: 2016-02-06. 网络出版日期: 2016-07-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61271074).

作者简介: 张鹤馨 (1991-), 女, 硕士研究生;

刘长军 (1973-), 男, 教授.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

1 微波无线能量传输基础

一个 MPT 系统由信号源、发射天线、接收天线及整流电路组成,如图 1 所示。MPT 系统效率包括微波源效率、发射天线效率、微波覆盖效率、接收天线效率、整流效率等。在不考虑大气损耗对天线传输效率影响的情况下,微波功率传输的峰值和均值都可以进行分析^[10]。

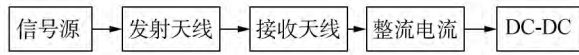


图 1 微波无线能量传输系统

假定发射天线具有增益 G_t ,发射功率为 P_t ,则距离为 R 处的功率密度 S_r 为

$$S_r = \frac{G_t P_t}{4\pi R^2}$$

式中发射天线的增益可以表示为 $G_t = \frac{4\pi\epsilon A_t}{\lambda^2}$ 。 ϵ 为口径效率; A_t 为发射天线等效面积; λ 为波长。接收天线收到的功率为

$$P_r = S_r A_r$$

式中 A_r 为接收天线等效面积。令天线间的能量传输系数 Z 为

$$Z = \frac{D_r D_t}{\lambda R}$$

式中: D_t 为发射天线的直径; D_r 为接收天线的直径。由 Friis 公式可知覆盖效率 $\eta = P_r/P_t$ 为

$$\eta = \frac{P_r}{P_t} = \frac{A_r A_t}{r^2 \lambda^2} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \epsilon Z^2 \quad (1)$$

式(1)是理想状态下的计算公式,在实际应用中并不完全准确。一种出于经验的算法则能够得到更加准确的结果。通过公式 $\frac{P_r}{P_t} = 1 - e^{-Z^2}$ 计算覆盖效如图 2 所示^[11]。

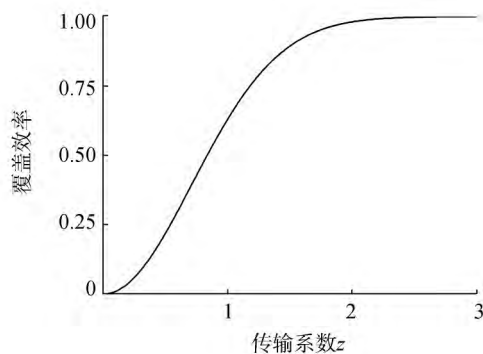


图 2 覆盖效率随传输系数变化趋势曲线

假定 MPT 系统发射天线为均匀幅度与均匀相位分布,则接收端接收到功率密度分布为远离发射天线一定传输距离的功率密度分布。根据惠更斯原理,对圆口径天线进行分析,归一化场分布函数为^[12]

$$E(\varphi) = \frac{2\lambda}{\pi D_t} \frac{J_1[(\pi D_t/\lambda) \sin\varphi]}{\sin\varphi} \quad (2)$$

式中: D_t 为发射天线口径; λ 为自由空间波长; φ 为相位对口径法线的角度; J_1 为一阶贝塞尔函数。对接收面上的任意一点到正对发射天线的中心点间的距离 r 。

$$\tan\varphi = \frac{r}{R}$$

式中: R 为接收端到发射端之间的距离。代入式(2)则归一化场分布图为

$$E(r, \theta) = \frac{2\lambda}{\pi D_t} \frac{J_1\{(\pi D_t/\lambda) \sin[\arctan(r/R)]\}}{\sin[\arctan(r/R)]}$$

令 $S_0 = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{4\pi\epsilon A_t}{\lambda^2}$ 为归一化系数,则接收功率密度分布函数 $S_r(r)$ 为

$$S_r(r, \theta) = S_0 \cdot E^2(r, \theta)$$

接收功率密度分布函数:

$$S_r(r, \theta) = S_0 \cdot E^2(r, \theta) = \frac{P_t \cdot J_1^2\{(\pi D_t/\lambda) \sin[\arctan(r/R)]\}}{4R^2 \cdot \sin^2[\arctan(r/R)]}$$

接收功率可以表示为

$$P_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{D_r}{2}} S_r(r, \theta) d(r \cos\varphi) d\theta$$

由以上一系列公式也可分析得知在某个特定的系统中 r 与 Z 为一一对应关系,用 Z 表示 r 同样能够看出覆盖效率与传输系数的变化关系。

因此,可以得出天线的传输效率与传输系数密切相关,而口径面积与传输系数呈正比关系。改变 SLR 值,变化趋势不变。覆盖效率随着口径面积的增大而增大,当接收天线的有效面积增大时,接收到更多的功率。接收天线的口径越大越有利于功率的接收。当接收天线增大时,接收端中心点与边缘接收到的功率相差变大。传统的 MPT 微波整流使用单一整流电路对应接收天线的所有阵列单元,许多整流电路都无法工作在最佳效率点上,导致整流效

率整体偏低,影响系统效率。

2 基于子阵分解的微波整流技术

有两种方法可以解决接收端功率分布不均匀的问题:

- 1) 设计非均匀接收天线阵列,使接收单元的输出的功率相同;
- 2) 采用均匀接收天线阵列,针对不同功率设计相应的整流电路。

文中采用后者,假定整流电路效率在某个范围内可以接受(功率动态范围),依据接收天线单元输出微波功率进行子阵分解,针对每个分解子阵的功率设计整流电路,维持系统高整流效率。

确定将接收端分为 N 个从中心到边缘的子阵,按照接收到的微波功率进行子阵分解,每个子阵接收到的功率占总功率的比例用数列 a_n 来表示,则分配给每个子阵的功率 P_n 为

$$\sum_{n=1}^N P_r \cdot a_n = \sum_{n=1}^N P_n = P_r, n \in (1, 2, \dots, N)$$

式中数列 a_n 满足以下条件: $\sum_{n=1}^N a_n = 1, a_n > 0$ 。由于靠近中心的单元接收到的功率高,远离中心接收功率低,即数列 a_n 为递减数列。

假定 a_n 为 N 项等差数列 $a_n = a_1 + (n-1)d, n \in (1, N), d$ 为公差,则根据归一化条件可以得到 $a_n = \frac{1}{N} + (n - \frac{N+1}{2})d$ 并且令 $d = -\frac{1}{N(N-1)}$ 。则第 n 个子阵接收到的功率占总接收功率的比例为

$$a_n = \frac{1}{N} - \frac{2n - N - 1}{2N(N-1)} \quad (3)$$

根据前面推导的接收功率的分布函数 P_r ,通过对分解后不同子阵进行面积分,确定该子阵的边界

$$[r_{n-1}, r_n] \left(r_0 = 0, r_N = \frac{D_t}{2} \right)。$$

$$P_n = \int_0^{2\pi} \int_{r_{n-1}}^{r_n} S_r(r, \theta) d(r \cos \varphi) d\theta = P_r \cdot a_n$$

在依次确定 N 个子阵的边界后,求出每个子阵的功率动态范围区间为 $[S_r(r_n), S_r(r_{n-1})], (S_r(r_0) = 0, S_r(r_N) = S_0)$ 。

随着输入功率增加,整流效率持续升高;当输入功率增大到最佳值时,整流效率达到最高;随着输入

功率继续增加,整流效率下降得越来越快^[13]。因此,为了保证子阵内整体整流效率,应该将整流电路的最佳输入功率设计到子阵内略低于子阵最大功率的值上。确定接收天线上的整流功率设计点后,通过对整流电路的合理排布,完成从微波到直流的高效转换。

3 微波无线能量传输演示实验

构建 1 个微波无线能量传输系统进行子阵分解整流,通过仿真和实验验证子阵分解整流的有效性,如图 3 所示。系统采用固态信号源 XT-14010,频率 5.80 GHz,最大输出功率 100 W。利用 1:4 功分器将微波信号馈入到 4 个天线单元。发射天线为口径为 0.5 m 的平面天线。

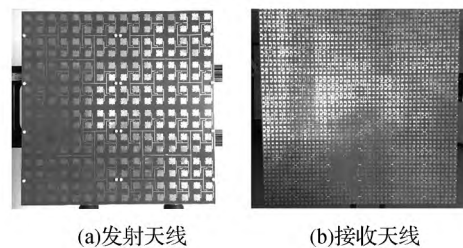


图3 微波无线能量传输系统实验装置发射天线、接收天线

接收天线是由 36 个单元组成,其口径为 1.5 m。

辐射远场边界在 $\frac{2D^2}{\lambda} \approx 9.67 \text{ m}, 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \approx 0.96 \text{ m}$

为感应近场边界, D 为发射天线口径。本实验在介于感应近场区与辐射远场区之间的辐射近场区进行,感应场分量不占主导地位,且靠近远场边界,此时发射天线方向图基本形成,其测量数据与远场误差不大。当发射天线和接收天线距离 6 m 时,调节发射功率并且测试其每个单元的接收功率,可得到接收天线接收到的微波功率总和为 1 000 mW。

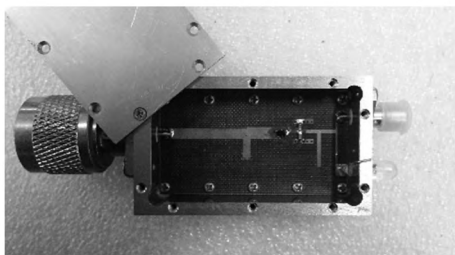
对接收端进行子阵分解,根据接收天线的单元排布及整流电路特性,将接收端分为 3 个子阵,即 $N=3$ 。代入式(3),每个子阵接收到的功率占总功率的比例分别为: $a_1 = \frac{1}{2}, a_2 = \frac{1}{3}, a_3 = \frac{1}{6}$ 。再对不同子阵进行面积分,得到分解后的 3 个子阵接收的功率的边界,分别为 $r_1 = 0.29 \text{ m}, r_2 = 0.45 \text{ m}$ 和 $r_3 = 0.75 \text{ m}$ 。计算得到的各个子阵相关数据见表 1。

表 1 子阵分解及最佳功率点设计

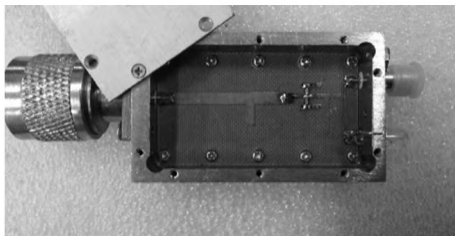
P_n / mW	R_n / m	S_r / dBm	第 n 个子阵范围/dBm	最佳 $P_{\text{IN}} / \text{dBm}$
$P_1 = 500$	$r_1 = 0.29$	$S_r(r_1) \approx 18$	[18, 22]	21
$P_2 = 400$	$r_2 = 0.45$	$S_r(r_2) \approx 13$	[13, 18]	17
$P_3 = 166$	$r_3 = 0.75$	$S_r(r_3) = 0$	[0, 13]	10

按照所得结果,结合每个天线单元的口径进行调整,最终将 6×6 个单元按照分解为 3 个子阵。子阵分解后,对每个子阵选取最佳整流功率,得到 3 个输入功率设计点分别为 21、17 和 10 dBm。

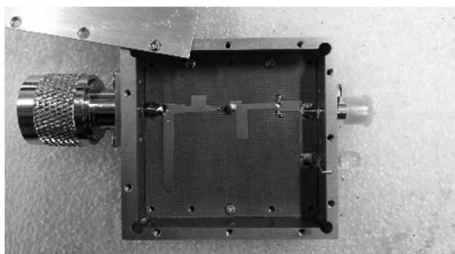
针对子阵分解后的最佳输入功率点,设计 3 款基于 HSMS286C 肖特基二极管的微波整流电路^[14],如图 4 所示。



(a) 整流电路 A



(b) 整流电路 B



(c) 整流电路 C

图 4 A、B、C 三种微波整流电路最佳输入功率分别为 21、17 和 10 dBm 的微波整流电路

分别测试 3 种整流电路,得到整流效率与输入功率的关系,如图 5 所示。以 21、17 和 10 dBm 为输入功率点设计的整流电路,其最高整流效率分别为 65%、69.15% 和 68.64%。根据每个电路适用的功率动态范围,修正子阵分解的边界。电路 A、B 和 C 分别适用于 19~22、13~19 和 0~13 dBm 的微波输入功率。因此,对照接收天线各单元的功率,将 36 个

单元基于整流电路输入功率的动态范围进行子阵分解,结果如图 6 所示。

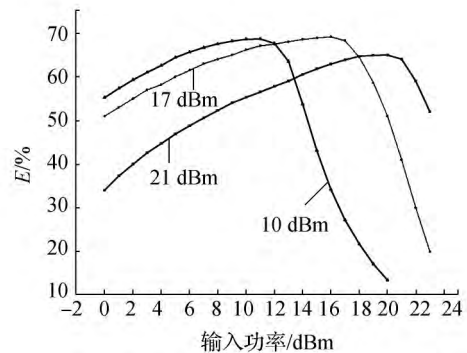


图 5 3 种整流电路的效率与输入功率关系

单元	1	2	3	4	5	6
1	-4.5	3.8	4.08	5.91	0.05	-4.8
2	3.3	12.8	15.88	17.4	13.73	2.3
3	3.3	18.8	19.56	22.27	18.23	5.1
4	5.02	16.15	19.1	20.1	17.81	6.2
5	2.68	12.5	17	17.5	6.8	2.4
6	-4.7	3.65	4.08	6.9	-2.05	-4.5

图 6 接收天线各单元接收功率(单位 dBm)及子阵分解图

不同子阵接入相对应的整流电路后,采用 Agilent 34970A 数据采集仪监测并记录直流输出电压,从而可以得到输出直流功率。整流电路的 MW-DC 转换效率为

$$\eta = \frac{P_{\text{DC}}}{P_{\text{IN}}} \times 100\% = \frac{V_L^2/R_L}{P_{\text{IN}}} \times 100\%$$

式中: P_{DC} 、 P_{IN} 分别为直流输出功率和微波输入功率; V_L 、 R_L 分别为直流输出电压和负载^[15-17]。

采用子阵分解法,各单元输出的直流功率可以测得,具体数据见表 2。若采用传统的单一整流电路,与子阵分解整流天线的结果对比如表 3 所示。子阵分解整流天线比传统的单一整流电路的整流天线效率有 10% 以上的提高。

表 2 子阵分解及最佳功率点设计

各单元功率/mW	1	2	3	4	5	6
1	0.051 61	0.617 5	1.424	1.366	2.117	1.381
2	1.750 00	13.930 0	14.480	22.330	12.510	5.137
3	5.912 00	30.260 0	42.840	54.030	26.010	7.069
4	7.890 00	20.360 0	36.460	55.530	26.100	7.184
5	2.558 00	10.300 0	13.370	23.580	14.400	4.830
6	0.491 60	0.473 70	3.322	4.110	2.869	1.291

注: 直流功率为 478.3 mW; MW-DC 效率为 47.8%。

表 3 采用子阵分解与采用单一整流电路整流天线效率对比

方案对比	子阵分解	全部电路 A	全部电路 B	全部电路 C
直流功率/mW	478.3	362.7	351.0	306.4
整流效率/%	47.8	36.3	35.1	30.6

4 结束语

文中提出了一种基于子阵分解的高效微波整流天线能量回收方案,并且采用微波无线能量传输系统对子阵分解整流的方法进行了验证,比传统方法得到 10% 以上的效率提升。通过获得天线接收面上的功率密度分布,设定子阵数量和各子阵所得功率,从而确定各子阵功率边界值和子阵范围。基于子阵与功率范围进行微波整流电路最佳输入功率的设计,提高了整流天线阵列整体效率。

通过 1 个微波无线能量传输演示系统进行了验证,全部采用 1 种整流电路的接收端效率均低于基于子阵分解整流天线接收端的效率。文中提出的基于子阵分解的整流天线可以弥补微波功率分布不均匀导致大部分功率未被充分利用的问题。实验结果显示,基于子阵分解设计的整流天线整体的转换效率比单一整流电路的接收端转换效率提高 10% 以上。该技术可望在微波无线能量传输系统中得到广泛的应用。

参考文献:

[1]侯欣宾,王立.空间太阳能电站技术发展现状及展望[J].中国航天,2015(2):12-15.
[2]李振宇,张建德,黄秀军.空间太阳能电站的激光无线能量传输技术研究[J].航天器工程,2015,24(1):31-37.
[3]李向阳,石德乐,李振宇,等.无线能量传输系统能源管理技术研究[J].空间电子技术,2013(3):61-65.
[4]MATSUMOTO H,HASHIMOTO K. Supporting document for the URSI white paper on solar power satellite systems[R]. URSI,2006.
[5]MIYAMOTO R Y, ITOH T. Retrodirective arrays for wire-

less communications[J]. IEEE microwave magazine,2002,3(1):71-79.
[6]HUANG Wen,ZHANG Biao,CHEN Xing,et al. Study on an S-band rectenna array for wireless microwave power transmission[J]. Progress in electromagnetics research,2013,135:747-758.
[7]胡文龙,姜弢.应用于 C 波段的宽带圆极化微带天线设计[J].应用科技,2014,41(5):32-35.
[8]张秀梅. RFID 技术的电子市民卡系统设计与实现[J].应用科技,2012,39(1):75-78.
[9]ZHANG B,ZHAO X,YU C,et al. A power enhanced high efficiency 2.45 GHz rectifier based on diode array[J]. Journal of electromagnetic waves and applications,2011,25(5/6):765-774.
[10]KRAUS J D,MARHEFKA R J. Antennas for all applications[M].3rd ed. New York: McGraw-Hill,2001.
[11]BENFORD J. Space applications of high-power microwaves[J]. IEEE transactions on plasma science,2008,36(3):569-581.
[12]HANSEN R C. Microwave scanning antennas[M]. New York: Academic Press,1964.
[13]HEMOUR S,ZHAOYangping,LORENZC H P,et al. Towards low-power high-efficiency RF and microwave energy harvesting[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques,2014,62(4):965-976.
[14]ZELJAMI K,GUTIERREZJ,PASCUALJ P,et al. Characterization and modeling of Schottky diodes up to 110 GHz for use in both flip-chip and wire-bonded assembled environments[J]. Progress in electromagnetics research,2012,131:457-475.
[15]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.
[16]张彪,刘长军.微波无线能量传输中 S 波段整流电路研究[J].真空电子技术,2013(5):63-66.
[17]ZHANG Biao,JIANG Wan,YU Chengyang,et al. A C-band microwave rectifier without capacitors for microwave power transmission[J]. International journal of microwave and wireless technologies,2015,7(6):623-628.

文中引用格式:

张鹤馨,刘长军.一种基于子阵分解的高效整流天线阵列[J].应用科技,2016,43(4):57-61.
ZHANG Hexin,LIU Changjun. A high-efficiency microwave rectenna array based on subarray decomposition[J]. Applied Science and Technology,2016,43(4):57-61.