

林先其<sup>1</sup> 许冬冬<sup>1</sup> 曾姜杰<sup>1</sup> 樊勇<sup>1</sup>

# 微波输能技术的研究进展及发展趋势分析

## 摘要

微波输能技术(MPT)是实现远距离能量无线传输的主要方式之一,也是空间太阳能电站系统的核心技术之一.本文主要介绍了微波输能技术的国内外研究现状,并对微波输能技术的系统组成与关键技术做了分析,其中主要针对微波发射子系统与微波接收子系统两大模块进行了详细的讨论.最后,对微波输能系统技术所存在的问题以及未来发展的趋势进行了概括.

## 关键词

微波输能技术;空间太阳能电站系统;微波发射子系统;微波接收子系统

中图分类号 TN011

文献标志码 A

收稿日期 2016-11-30

资助项目 国家自然科学基金(61571084);教育部新世纪优秀人才(NCET-13-0095)

## 作者简介

林先其,男,博士,教授,博士生导师,教育部新世纪优秀人才,主要研究方向为天线理论与技术、无线输能、微波毫米波电路与系统.

xqlin@uestc.edu.cn

1 电子科技大学 电子信息工程学院,成都,611731

## 0 引言

1亿年前,数以万计的微生物、植物用千万年的时间收集太阳的能量并把其储存在大地深处,它们就是我们现在所使用的煤、天然气和石油.正是这千万年的积累才使人类在现代社会生活得如此舒适和富足.在过去的100年里,世界人口从17.5亿增长到70亿,超过20亿人移居到了城市,人类开始慢慢地步入现代化社会.与此同时,人类所需的能源也越来越多,现代社会正在快速地消耗着这些不可再生的能源.据资料显示,世界所剩下的石油储量仅够人类使用40年,天然气及煤炭储量则分别为55年和152年.21世纪面临着能源危机的挑战,急需寻求可持续发展的新能源来代替这些不可再生的能源,一方面解决能源短缺的问题,另一方面解决由于煤、天然气和石油等矿物能源使用所带来的环境污染问题.太阳能、风能、水能和地热能等新能源正在逐步被人类研究和利用,其中太阳能更是一种巨大、久远、无尽的能源.尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为其总辐射能量(约为 $3.75 \times 10^{26}$  W)的22亿分之一,但是已高达 $1.73 \times 10^5$  TW,也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于500万吨煤.从某种程度上来说,地球上的风能、水能等能源均来自太阳能,即使是地球上的化石燃料(如煤、天然气、石油等)从根本上说也是远古以来贮存下来的太阳能.

近年来对于太阳能利用的研究越来越多,其中空间太阳能电站系统(Space Solar Power System, SSPS)就是一种采集空间中的太阳能,并转为地球表面使用的系统.空间太阳能电站系统<sup>[1]</sup>如图1所示,它是将太阳能卫星放置在同步轨道或近地轨道,通过太阳能电池板持续接收空间太阳能并将其转化成电能,然后将电能转化成电磁能量通过无线能量传输的方式将能量输送到地球表面的接收系统.其中微波输能技术(Microwave Power Transmission, MPT)占到了主导性作用,它可以将能量以无线的形式进行大功率、远距离的传输,这为空间太阳能电站的充分利用提供了基础.相对于利用交通工具或高压输电设备等传统的能量传输方式,微波输能技术由于其独特的优点,它的应用领域也日益扩展,除了用于太阳能发电卫星计划之外,微波输能还可以应用于临近空间飞行器、微波驱动直升机、机器人供能及偏远地区的能量传输<sup>[2]</sup>.

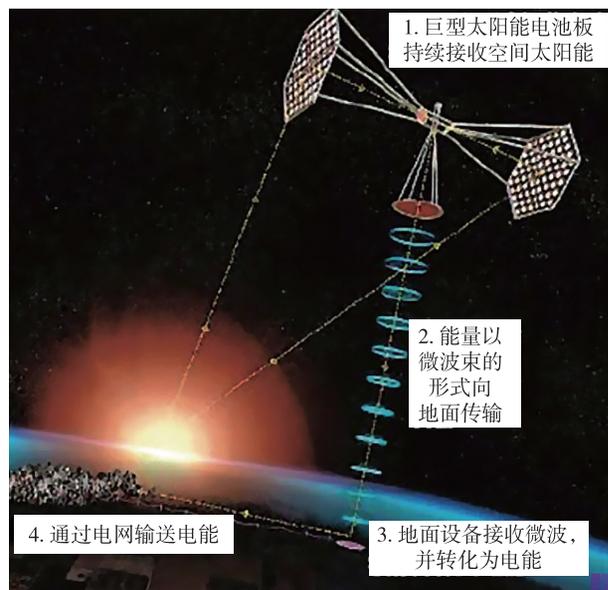


图1 空间太阳能电站系统示意<sup>[1]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of Space Solar Power System<sup>[1]</sup>

## 1 国内外的研究进展

### 1.1 国外的研究

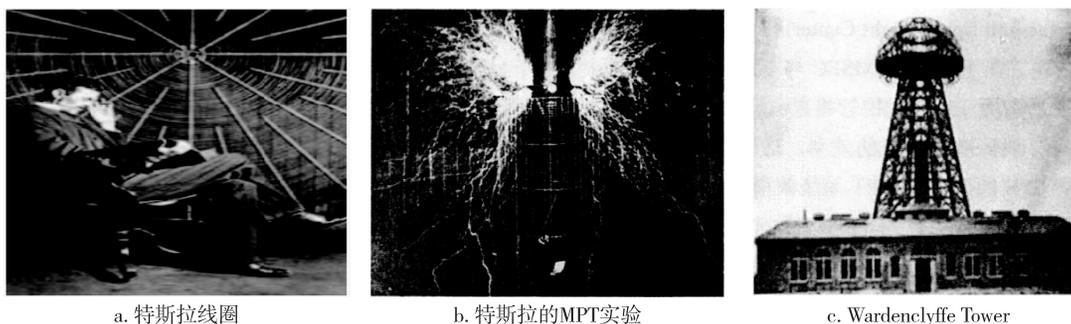
1888年,基于麦克斯韦理论,Heinrich Hertz 利用火花隙式无线发射机第一次用实验验证了无线电的存在.1899年,特斯拉就用实验验证了赫兹用无线电波传输能量的理论并提出了无线电能传输(Wireless Power Transmission, WPT)的概念,如图2所示.图2a是特斯拉建造的巨大“特斯拉氏感应圈”<sup>[3]</sup>,这也是特斯拉首次尝试无线输能<sup>[4]</sup>(图2b).随后他又领导建造了如图2c所示的Wardenclyffe Tower<sup>[4]</sup>.最后由于资金不足,Wardenclyffe Tower未能彻底完成.

20世纪30年代末,磁控管和速调管的发明解决了高频源的问题,同时促进了WPT从低频向微波频

率发展即MPT<sup>[5]</sup>.基于第二次世界大战期间微波管的发展,美国人Brown<sup>[6]</sup>开始了MPT的研究和开发,他在1964年与美国雷声公司合作完成了MPT系统的实验,成功利用了S波段的MPT系统驱动直升机.安装在该飞机机身上的整流天线阵接收发射天线发射的射频能量,然后通过整流电路将其转换成直流,整个整流天线阵输出的直流功率为200W.1968年,美国人Glaser发表了有关太阳能卫星的工作报告(S波段),它首先通过太阳能电池板获得太阳辐射的能量,然后通过微波源产生微波能量,最后通过发射天线阵列定向传送给地面上的大型整流天线阵.

1970年,马歇尔航天中心(MSFC)与雷声公司合作,不断提高整个MPT系统的效率.系统效率主要包括3个:微波源将直流变为射频的效率、发射天线的传输效率、接收端将射频转换为直流的效率,将这3个效率相乘就得到系统的总体效率.到1974年伴随着SPS的研究,MPT系统效率达到了54%左右,系统工作频率为2.446GHz,整流天线输出直流功率为495W,此效率被JPL(Jet Propulsion Laboratory)实验室的质保部认证为当时最高的MPT系统效率.如图3所示,1975年在JPL Goldstone的金星站成功地完成了MPT的演示.发射端是直径26m的抛物面天线,接收端是3.4m×7.2m的长方形阵列天线,收发端之间的距离是1英里.从速调管传出的2.388GHz的微波有450kW,整流输出的直流功率有30kW(DC),整流效率是82.5%.

1980—1990年之间日本和欧洲部分地区还有加拿大对MPT的研究较多,发展比较迅速.1980年加拿大提出了一种高空持续继电平台<sup>[7]</sup>(Stationary High Altitude Relay Platform, SHARP),该平台能够实现无人操作,无需燃料,通过微波给轻型飞机供能,使其保持长时间飞行状态.在1987年,大小为原



a. 特斯拉线圈

b. 特斯拉的MPT实验

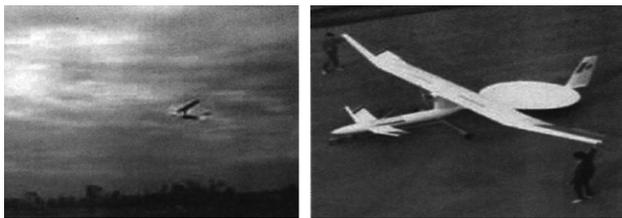
c. Wardenclyffe Tower

图2 特斯拉线圈<sup>[3]</sup>、特斯拉的MPT实验<sup>[4]</sup>以及Wardenclyffe Tower<sup>[4]</sup>

Fig.2 Telsa Coil<sup>[3]</sup>, MPT experiment of Telsa<sup>[4]</sup> and Wardenclyffe Tower<sup>[4]</sup>

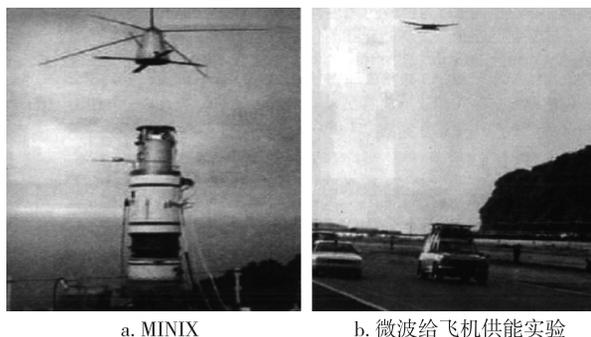
图3 JPL的第一次地对地MPT实验<sup>[3]</sup>Fig. 3 First ground-to-ground MPT experiment by JPL<sup>[3]</sup>

型1/8的SHARP由微波供能在150 m高空飞行了20 min,系统工作的频率为2.45 GHz,发射端采用抛物面天线进行发射,整流天线接收的功率密度可达 $400 \text{ W/m}^2$ ,转换的直流能量为150 W,这种级别的直流能量可以使4.1 kg的飞机起飞(图4).

图4 SHARP飞行实验和1/8模型<sup>[7]</sup>Fig. 4 Flight experiment of SHARP and its 1/8 model<sup>[7]</sup>

1983年,在数值预测基础上日本进行了MINIX(微波电离层非线性交互实验)实验<sup>[8]</sup>(图5a),该实验MPT系统工作频段2.45 GHz,实验过程中对强微波束在电离层中的影响进行了评估和计算机仿真.1992年日本又进行了微波给飞机供能的实验(图5b),微波能量通过汽车上的固态相阵发射到飞机上,整个MPT系统工作频率为2.41 GHz.

20世纪90年代日本京都大学的RISH分别提出了相位控制磁控管<sup>[9]</sup>以及相位和幅度控制磁控管<sup>[10]</sup>,相位控制磁控管、相位和幅度控制磁控管系统工作的频率分别为2.45和5.8 GHz,这两项技术被应用于SPORTS(Space Power Radio Transmission System)2.45和SPORTS 5.8<sup>[11]</sup>.如图6a所示,SPORTS 2.45由3个子系统组成,分别是太阳能电池板提供直流输入,相位控制磁控管的相控阵作为微波发射器以及整流天线接收阵.太阳能电池板提供8.4 kW的直流能量给微波发射器,相位控制磁控



a. MINIX

b. 微波给飞机供能实验

图5 MINIX实验<sup>[8]</sup>Fig. 5 MINIX experiment<sup>[8]</sup>

管的相控阵通过磁控管将直流转化成射频发射出去,整流天线阵接收到2.45 GHz的射频功率为4 kW.SPORTS 5.8(图6b)的结构组成与SPORTS 2.45类似,不同的只是内部的结构以及器件工作的频率.SPORTS 5.8的发射模块由288个天线组成,发射功率为1.26 kW,整流天线的单元最大RF-DC效率为71.8%,输出直流功率为100 mW,最佳负载为 $200 \Omega$ .

NASA在日本的实验成功后也开始重新考虑大型SSP系统的研究与发展.2000年,NASAMSFC领导了“SSP科学探索研究与技术”项目,该项目对于Glaser之前提出的许多问题进行了诸多探讨,主要包括社会经济的评估、能源需求、环境影响以及法律问题.随着美国对SSP的再次关注以及日本和其他国家研究者的持续研究,SSP的发展趋于平稳.2001年法国国家科学研究中心在留尼旺岛搭建了一个点对点的无线能量传输系统,点亮了40 m外的200 W灯泡,并成功将10 kW的电能输送到山谷的村庄<sup>[12]</sup>.2003年美国宇航局Dryden飞行中心提出了室内激光驱动飞机模型,年底SAE展览会上美国一家公司展出了微波充电汽车.2007年曼彻斯特技术研究团队(MIT)根据电磁共振原理,进行了相距2 m,收发2个线圈半径为60 cm无线能量传输系统的实验,并点亮了60 W的灯泡,效率为40%.2008年INTEL又重新做了MIT的实验,以更短的距离点亮灯泡,效率达到75%.2012年美国洛克希德马丁公司发明了激光无线充电系统,该系统成功为无人侦察机供电.

## 1.2 国内的研究

国内微波输能的研究较晚,1994年林为干院士首次引入微波输能的概念,然后中国科学院电工研

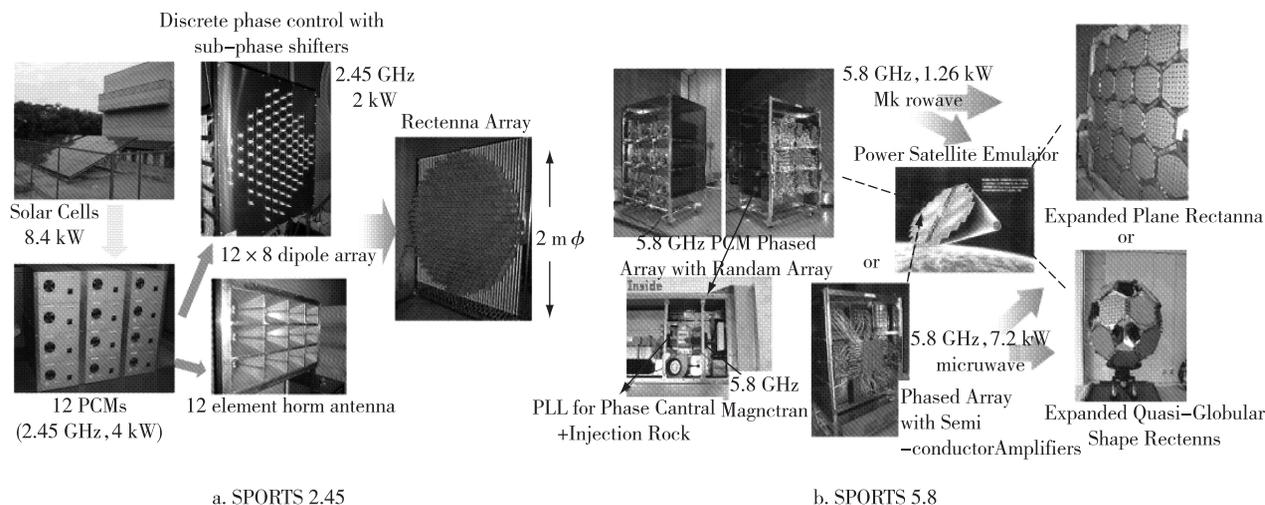


图6 SPORTS 2.45<sup>[11]</sup>以及SPORTS 5.8<sup>[11]</sup>  
Fig.6 SPORTS 2.45<sup>[11]</sup> and SPORTS 5.8<sup>[11]</sup>

研究所研究了微波输能系统中的各种关键技术,并分析了磁悬浮列车微波无线供电系统的可行性<sup>[13]</sup>.1998年电子科技大学李中云采用时域散射参数法对整流天线进行了理论分析,并仿真验证了二极管SPICE参数、输入功率、整流效率之间的关系<sup>[14]</sup>;随后电子科技大学李乐伟教授、樊勇教授以及林先其教授对不同功率下的微波能量传输进行了各种创新设计与实验.2009年,四川大学在某飞行训练机场进行了微波输能演示实验,其中发射端为平面天线,接收端为接收整流天线阵列,实现了200 m距离的微波输能实验.这是国内较早采用大规模阵列天线的长距离微波输能的外场实验.黄卡玛教授还分别在2009年和2013年提出了微波化学反应装置的微波能量传输方法<sup>[15]</sup>和一种多路注入锁定磁控管相干功率合成的微波源<sup>[16]</sup>,并对微波输能技术进行了较为深入的研究.上海大学自从1998年开始,在国家自然科学基金等项目的支持下,对MPT系统的关键技术做了比较系统和深入的探索,在国内较早实现了对管道机器人的微波输能<sup>[17]</sup>.其中上海大学的杨雪霞对接收整流天线阵进行了模型的分析,对整流

天线的串联、并联和串并联混合组阵进行了讨论<sup>[18]</sup>.虽然我国对微波输能系统中的关键技术进行了一些较为深入的研究,但是大功率远距离的无线输电方面实验项目还是太少.

## 2 微波输能系统组成

微波输能系统主要由微波发射子系统、微波接收子系统及空间传输三部分组成,具体电路由微波发射机、发射天线阵、接收天线阵和整流电路4个部分组成.其中,微波发射机主要包括信号源和功率放大器两部分;整流电路包括整流单元以及直流合成网络两部分.整个演示系统<sup>[19]</sup>组成如图7所示.

目前微波输能系统使用的频率主要有2.45以及5.8 GHz,采取这些频段进行能量传输是综合考虑了受大气影响情况、链路传输效率、系统规模以及技术成熟度等方面的因素.随着元器件技术以及加工工艺的不断发展,微波输能系统的工作频率可以提高到35 GHz甚至更高,从而使系统的质量和体积大大减小.

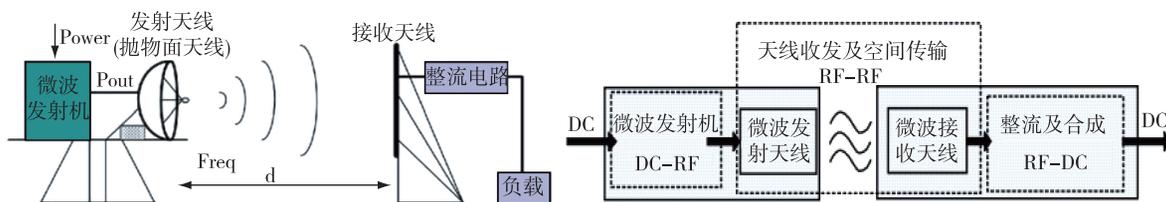


图7 微波输能系统

Fig.7 Block diagram of microwave power transmission system

## 2.1 微波发射子系统

微波发射子系统由微波功率源和微波发射天线两部分组成.微波发射子系统的效率是由微波功率源的直流转化成射频的效率和微波发射天线的辐射效率相乘而得到的.其中微波功率源使用的器件有产生微波的真空管和固态器件两大类,微波真空管分为磁控管、行波管和速调管3种,而固态器件又分为半导体器件和混合器件.目前研究表明在2.45和5.8 GHz微波输能系统中磁控管的直流到射频的转换效率最高可接近90%,同时磁控管的成本较低,所以磁控管是目前微波输能系统中使用最多的直流到射频的转换器件.其他类型的器件在大功率输出以及频谱控制方面也具有相对的优势,所以根据实际情况的需要,这几类剩下的器件在特定的情况下也会发挥很大的作用.对于35 GHz甚至更高频段的这些器件正在不断地进行探索研究,但是目前尚不具备非常成熟的技术.微波源中直流转化成射频之后为了增加发射功率,有时候会加入功放,GaN功放<sup>[20]</sup>由于其效率高并且能够承受的功率非常大,所以得到了不断的发展研究,并且理论预测表明,其效率高于GaAs功放.

微波发射天线阵进行正常的工作需要具备两个基本的功能:1)具有方向跟踪定位功能,若接收天线是随设备移动的,则发射天线阵必须能够对移动的设备进行实时的波束跟踪,从而完成射频能量的传输;2)将磁控管转换的微波能量尽最大可能辐射给接收天线的接收角 $\Omega$ 区域内,也就是发射天线阵必须具备高聚焦能力.第一个功能可以通过给微波发射子系统增加波束回溯控制<sup>[21-25]</sup>实现,文献[21-24]中的波束回溯控制基本上都是通过一个编码好的导频信号来实现的,这个导频信号由接收端反馈的来波所得.假设一个 $N$ 单元的二维发射天线阵,位于 $(x_n, y_n)$  ( $n=0, \dots, N-1$ )处的单元接收到发射端反馈回来的导频信号电压为 $\gamma_n$ ,  $n=0, \dots, N-1$ ,该信号的相位为 $\angle \gamma_n = \chi_n$ ,  $n=0, \dots, N-1$ ,则文献[23]中所提到的相位共轭的方案可大致分为以下3步:

- 1) 计算导频信号的相位 ( $\angle \gamma_n = \chi_n$ ,  $n=0, \dots, N-1$ );
- 2) 计算每个单元所接收到的导频信号相位与系统自带的参考本阵的相位( $\hat{\chi}$ )的差值:  $\Delta \chi_n = \chi_n - \hat{\chi}$ ,  $n=0, \dots, N-1$ ;
- 3) 给第 $n$ 个单元的馈电相位为  $\varphi_n = -\Delta \chi_n$ ,  $n=0, \dots, N-1$ .

通过相位共轭方案处理后,发射天线阵就能够通过导频信号来自动跟踪移动接收设备.第二个功能就是要通过调节天线阵的馈电,设计最合适的网络来实现最佳的聚焦能力<sup>[26-28]</sup>.

在文献[29]中,一个由256个单元组成的5.8 GHz的相控阵天线如图8a所示,输出的射频功率为1.5 kW.该相控阵天线通过旋转电场矢量的方法(REV)来实现天线电场的计算并通过软件回溯系统来控制对接收部分的跟踪,对接收部分的跟踪误差可以实现小于 $0.1^\circ$ .文献[23]中设计了一个小规模由2个子阵组成的MPT天线,每个天线单元由微带贴片切去边角实现圆极化,该阵的工作频率为5.8 GHz,传输功率为40 W,由于结构简单,所以跟踪的角度只有 $\pm 5^\circ$ .

现阶段大多数的MPT发射天线阵都是基于均匀馈电的方案<sup>[30-34]</sup>,在文献[31-32]中就运用了均匀加权辐射模块实现了大的辐射结构,从而能够将20 W的射频功率传输150 km.相同的设计思路也运用在文献[30,34],如图8b所示.在文献[30]中发射天线阵由5个均匀馈电的喇叭天线组成一个相控阵天线,传输的功率为4 W.该相控阵工作在5.8 GHz,同时在旁边增加了导频信号的收发天线,导频信号通过后台的计算机处理,从而控制相控阵的波束对移动的微型飞行器进行跟踪,在方向位上的跟踪最大误差为 $1.97^\circ$ ,横向上的跟踪最大误差为 $1.79^\circ$ .在文献[34]中验证了有源相控阵和有源集成相控阵作为微波输能的发射天线阵的可行性,图9a所示为 $4 \times 8$ 的一个有源相控阵,该发射天线阵的发射功率为120 W,接收天线装在一个移动的小车上,该车的驱动平均功率需要4 W,发射与接收端的平均距离为25 m并且通过安装在接收端的超声波系统来进行定位;图9b所示为 $8 \times 4$ 的一个有源集成相控阵,该发射阵模拟了无线通信和功率传输,发射5.8 GHz的载波携带了2 Mbps的MSK调制信号.

## 2.2 微波接收子系统

微波接收子系统最重要的就是整流天线的设计,高效率的整流天线是微波输能的关键技术之一.尽管之前大部分对于整流天线的研究都是对单个整流天线的研究<sup>[33-35]</sup>,但是由于单个整流天线输出的直流功率较小,而往往现实中所需要的是大功率远距离的传输,所以近年来对于整流天线的组阵也越来越多<sup>[35-40]</sup>,只有通过很多的整流天线阵的组合才能满足现实中对于大功率的需求.

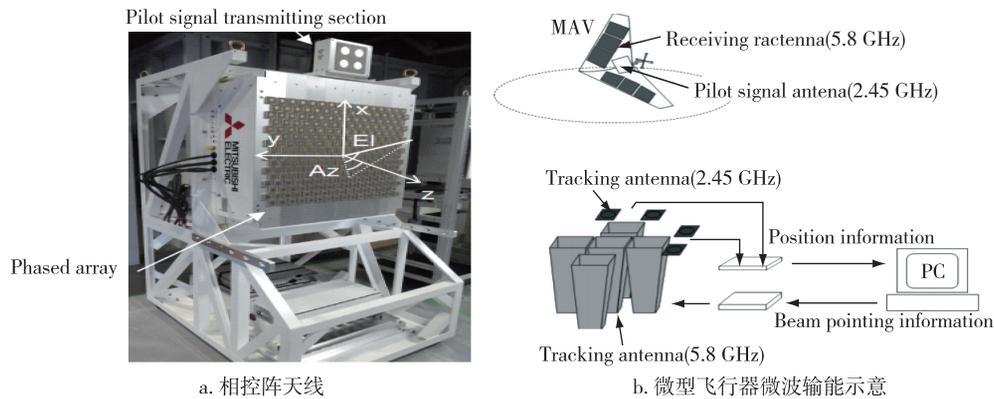


图 8 相控阵天线<sup>[30]</sup>以及微型飞行器微波输能示意<sup>[30]</sup>

Fig. 8 Phased array antenna<sup>[30]</sup> and schematic diagram of microwave power transmission for micro aerial vehicle<sup>[30]</sup>

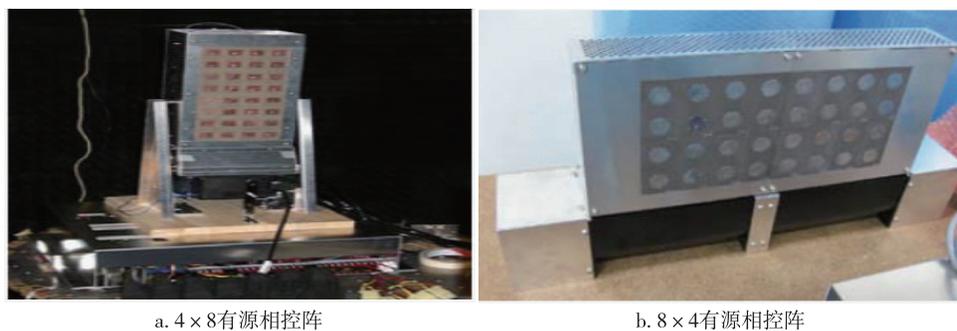


图 9 有源相控阵天线阵<sup>[34]</sup>

Fig. 9 Active integrated antenna array<sup>[34]</sup>

整流天线由接收天线与整流电路两部分组成,整流电路中整流二极管性能是决定整流效率的关键因素.20 世纪 70 年代,由于金属-半导体结的重复性较好,肖特基二极管逐渐取代了点接触式半导体二极管,并且肖特基二极管可以达到的整流效率接近 80%~90%.对于整流二极管的选择十分重要,因为整流二极管自身的性质对整流效率的影响非常大.在查找整流二极管的类型时,必须选择寄生串联电阻、零偏置电容较小以及反向击穿电压较大的整流二极管,这样的整流二极管的整流效率相对而言会更高.当然在实际中需要运用专业软件(ADS)对整流电路进行仿真设计,对整流电路的输入功率、负载值、源内阻等参数进行综合考虑才能得到整流电路最佳的整流效率.

接收天线的形式也多种多样,常见的有微带贴片天线、偶极子天线以及其他形式的天线等.接收天线的极化方式大致分为线极化和圆极化.图 10 是整流天线的组成框图,首先通过接收天线接收空间的射频信号,然后通过带通滤波器(对于 2.45 GHz 的

系统通带就包括 2.45 GHz,对于 5.8 GHz 的系统通带就包括 5.8 GHz,以此类推)将天线接收的基频信号输入到整流二极管上进行整流,带通滤波器还有一个作用反射二极管的高频信号到整流二极管,使这些高频信号继续进行多次整流.低通滤波器可使整出的直流信号通过,同时将基频和基频以上的谐波反射回去进行多次整流以提高整体的整流效率.

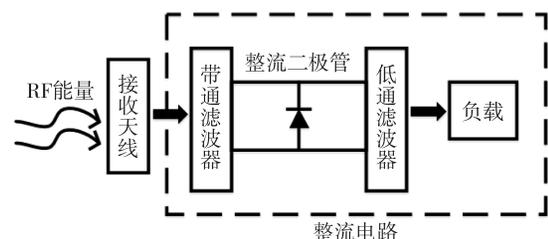


图 10 整流天线组成

Fig. 10 Block diagram of rectenna

整流天线的效率  $\eta$ ,分为接收天线对射频信号的接收效率  $\eta_1$  和整流电路的整流效率  $\eta_2$  两部

分,即:

$$\eta_r = \eta_1 \times \eta_2, \quad (1)$$

$\eta_1$  的优化设计是通过合理设计接收天线而得到的,  $\eta_2$  的优化设计综合考虑了整流二极管特性参数、阻抗匹配程度、直流负载以及高次谐波的抑制等问题,通过整体对整流电路的设计从而使  $\eta_2$  达到最佳.若整流天线的负载为  $R_L$ , 负载得到的电压为  $V_D$ , 则  $\eta_r$  为

$$\eta_r = \frac{V_D^2}{R_L \times P_{rec}}, \quad (2)$$

其中  $P_{rec}$  为接收天线接收到的功率.

文献[41]设计了一个电感补偿的整流电路,通过电感补偿电路中的电容使失配更小从而提高整流效率,在 9 dBm 的输入功率下最佳的整流效率为 86.7%.文献[42]设计了一个 5.8 GHz 圆极化双菱形环的整流天线,  $4 \times 1$  的高增益右手圆极化双菱形环天线和反射面设计为接收天线,圆极化增益为 14.6 dB, 3 dB 轴比带宽为 7%,整流天线的效率达到了 82%.文献[43]设计了一个 2.45 GHz 的圆极化微带贴片天线,天线的 10 dB 回波损耗带宽为 300 MHz, 3 dB 轴比带宽为 30 MHz,最高的整流效率为 37.8%.文献[44]设计了一个宽带谐波抑制的整流天线,该天线具有较好的高次谐波抑制,在输入功率 10 dB 下的最佳效率为 70.2%.文献[45]设计了一个高功率的整流电路,该整流电路首先将射频信号通过耦合器分成 4 路进行桥式整流,然后通过串联和并联的方式将获得的直流能量合成起来,在 920 MHz 的时候串联的整流效率为 62%,并联的整流效率为 76%,并通过这个整流电路给手机进行了充电实验.文献[46]设计了一个 6 频带的双圆极化天线,6 个频带分别为 550、750、900、1 850、2 150 和 450 MHz 这些数字电视、LTE/4G、GSM900、GSM1800/4G 和 WiFi 的频段,接收天线为蝴蝶结形自互补对数周期交叉偶极子天线,通过  $90^\circ$  相位差馈电实现圆极

化,最大的整流效率为 67%.文献[47]设计了多种整流电路,并做了简单的微波系统的演示,最佳的整流天线效率为 80.78%.表 1 中列出了一些不同频率、不同接收天线形式,以及不同输入功率情况下,整流天线单元的输出功率(或电压)和转换效率,其中输出功率(或电压)和转换效率均是最大值.

现实需求中需要大功率远距离的传输,上述所描述的整流天线大多数都是单个的整流天线单元,每个单元的输出直流功率大都在 100 mW 以下,即使组阵也是很小的阵,比如在文献[50]中组的就是  $3 \times 3$  的小阵.当我们要求的输出直流功率为几百瓦或者几千瓦的时候就必须组成一个很大的整流天线阵.图 11 给出了整流天线阵的常规设计的几种方案.

整流天线组阵的第 1 种方案如图 11a 所示.首先对天线进行组阵,然后再将天线阵接收到的射频信号通过射频合成集体进行整流,但是这种方案对整流电路要求太高.由于合成的射频功率较大,所以必须要求整流二极管的耐压值要高,但是实际中的整流二极管的耐压值是有限的,而且随着耐压值的增高,电容必定会增大,这样必然会引起整流效率的降低,所以这种方案只能适合中功率的整流,不适合大功率远距离的传输.第 2 种方案如图 11b 所示.首先组成一些整流天线的子阵,然后再将这些子阵作为一个单元再进行组阵,这种方案就要比第 1 种要灵活得多,对整流二极管的要求也不那么高,输出的直流功率也比较大.第 3 种方案如图 11c 所示,就是通过串并联、串联并联混合组成子阵的方式进行整流天线的组阵,该方案比第 2 种更加灵活,与第 2 种组成的子阵不同,这种方案组成的子阵可以通过单个整流天线随意组合,是目前采取的最为普遍的方案,其组成的超大阵输出的直流功率可以达到几百瓦或者几千瓦,满足实际的需求.

表 1 整流天线性能<sup>[13]</sup>

Table 1 Performance of rectennas<sup>[13]</sup>

频率/GHz	接收天线类型	天线极化	输入功率密度或输入功率	收发天线距离/m	输出直流功率或电压	整流效率/%
2.45	方形贴片 <sup>[48]</sup>	线极化	20 dBm	1	1.8 V	56
5.5	方形贴片 <sup>[49]</sup>	圆极化	2.55 mW/cm <sup>2</sup>	0.35	1.74 V	57.3
5.61	双菱形环天线 <sup>[50]</sup>	圆极化	7.6 mW/cm <sup>2</sup>		0.85 W(组阵)	78
5.8	切角方形贴片 <sup>[51]</sup>	圆极化	19 mW/cm <sup>2</sup>		12.6 V	74
5.8	共面贴片天线 <sup>[52]</sup>	线极化	18 dBm	2.3	43.2 mW	68.5
5.8	环形开槽天线 <sup>[53]</sup>	圆极化	32 dBm	2	1.3 V	

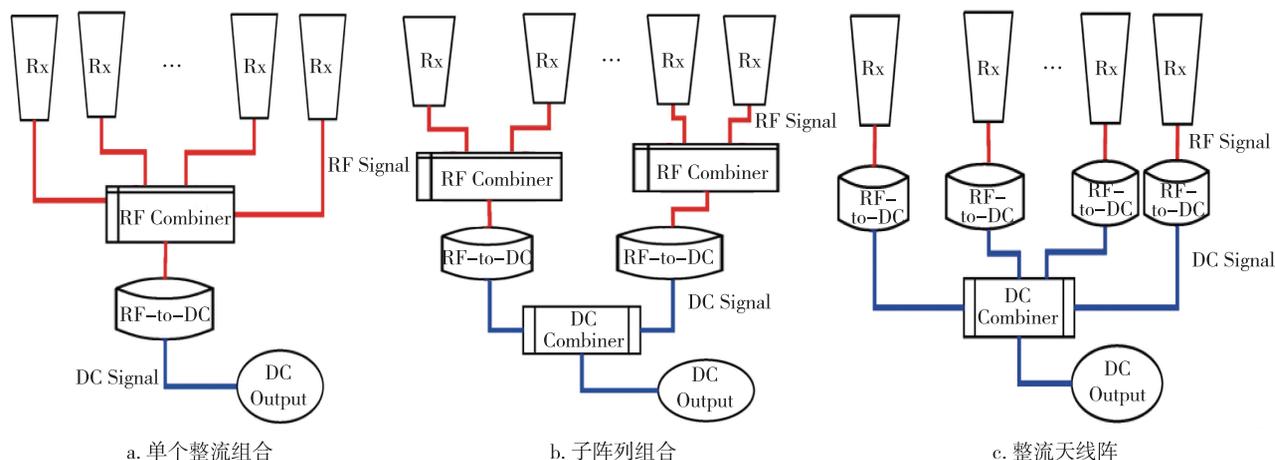


图 11 单个整流组合、子阵列组合以及整流天线阵<sup>[26]</sup>

Fig. 11 Single rectifier combination, subarray combination and rectenna array<sup>[26]</sup>

文献[54]分析了2种不同的整流组合的性能,一种是首先进行天线组阵,也就是第1种方案,另一种是先单个天线整流然后进行直流合成.分析结果表明2种方案的好坏可以通过单元个数、射频组合效率、直流组合效率等因素进行估算.实际中我们可以通过这些因素选择较好的一种组合方案,从而达到最佳的直流输出.文献[55]分析了在组成超大阵的时候串并联连接方式对组阵后的直流输出功率的影响,该分析方法是将每个整流天线等效为一个等效源加上源内阻然后外接负载,再分析此模型通过串并联或者串联并联组合的方式得到的效果,这种方法在理论上给出了一个组阵方案的参考,但是实际中的每个整流单元都不同,所以实际效果还得通过实验进行验证.

文献[56]设计了一个超大的整流天线阵,总共有2304个整流天线单元,整流天线阵的大小为3.2m×3.6m,最大的直流输出接近600W,整体的整流效率接近50%.文献[57]设计了一种新型的整流天线结构,这种结构很适合进行整流天线的组阵.文献[58]也设计了一种新型的整流天线结构,这种结构

与文献[55]中的整流天线结构具有很大的相似之处,也很容易实现整流天线的组阵.文献[59]设计了一个整流天线阵,这个天线首先是将16个整流天线单元组成一个子阵,然后将这样的16个子阵再次组成一个大阵,整个大阵的整流单元个数为256个.由于实验时输入整流天线阵的射频功率较低,所以最后总的输出直流功率接近600mW,效率为60%.文献[60]设计了一个微带偶极子整流天线阵,该整流天线阵具有32个整流天线阵单元,在发射功率为1257mW的情况下得到的直流功率为210mW,系统整体的效率为16.7%.文献[61]设计了一个垂直堆叠的整流天线阵,总共堆叠了4层,每层上都有16个整流单元,实验结果表明4层堆叠得到的直流功率是单层的5倍.这种堆叠的设计可以将整流天线阵实现三维的组阵,可以有效利用空间.文献[62]将频率选择表面与整流天线进行了综合的设计,该混合设计可以运用在实际环境中,最后实验用的是4×3的一个整流天线阵.表2给出了一些研究计划及其整流天线阵列研究成果.

表 2 微波输能实验中的整流天线阵<sup>[13]</sup>

Table 2 Rectenna array of MPT experiments<sup>[13]</sup>

年份	研究机构或项目名称	频率/GHz	距离/m	阵列单元个数	输出直流功率	转换效率/%
1976	美国 JPL <sup>[63]</sup>	2.388	1540	270	30 kW	
1992	日本 MILAX <sup>[64]</sup>	2.411	15	120		52
1992	美国 DSRC <sup>[52]</sup>	5.87		1000		
1996	美国 WSF <sup>[65]</sup>	5.8	100		65 kW	
1998	日本京都大学 <sup>[56]</sup>	2.45	42	2304	600 W	50
1999	韩国 KERI <sup>[66]</sup>	2.45	10	400	202 W	69

### 3 微波输能的未来发展

能源危机是 21 世纪人类必须要面对的问题,微波输能技术由于可以对太阳能进行很好的利用而得到了国内外积极的研究,但是,目前只有一些高校以及研究中心的 MPT 实验系统,而没有实际商用的 MPT 系统.阻碍微波输能实际应用的原因主要有以下几点:

1) MPT 的整体传输效率低下,能量扩散损耗以及热损耗严重,进而也导致了单位能量的传输成本昂贵.微波发射子系统中的 DC-RF 以及发射天线阵的发射效率这两部分效率已经达到了 90%,微波接收子系统的整流天线的效率也能达到 70% 甚至更高,但是制约整体系统效率的还是空间传输.目前超远距离传输时的空间传输效率很低,有时甚至只有百分之几,所以提高空间传输的效率是提高 MPT 整体系统效率的关键.

2) 微波发射子系统对于移动接收端的精确定位能力有待提升.实际应用环境复杂,传输对象的移动无规律,对于移动接收设备进行精确定位是实现 MPT 技术的基础,而目前对于移动接收端的定位研究还远远不够.

3) 整流天线阵的大规模共形化技术有待提升.实际中需要充电的设备如飞行器并没有给整流天线阵的安装提供很好的安装区域,这就需要接收的整流天线阵能够进行共形,以期能够实现更大面积的接收微波能.

4) MPT 系统中泄露的能量会对临近的通信、雷达等无线系统产生干扰.规划中的空间太阳能电站,其发射功率至少在兆瓦级别也即 60 dBW 以上,而常规天线阵列设计其副瓣电平抑制仅为 40 dB,也即其泄露功率为百瓦(20 dBW)级别.纵然是按照有文献报道的实验极限值 75 dB 的副瓣电平抑制,其泄露功率也有 30 mW 以上(-15 dBW),远大于现有通信系统的常规接收信号功率值.再则,若是对移动接收端进行跟踪充电,其泄露控制能力会进一步降低.

5) 大功率微波传输对环境以及生物的影响需要进一步分析与研究.随着无线系统的不断增加,电磁污染已越来越多地受到人们的重视,而对于微波能量传输系统,其功率级别比之通信系统更高,更会引起人们的恐慌心理.另外,大功率微波对自然界中的各类生物也会产生多种影响,如微波热效应以及生物电效应等.这些也需要进一步研究并提供相应的对策.

针对空间传输效率低下以及接收整流天线的共形问题,国内外专家提出了分场景的不同频段微波能量传输技术,如在太空以及近距离场景下采用毫米波段,以期利用相同口径更高增益的天线收发来提升空间传输效率并实现更好的共形设计.针对动目标的能量传输,则可以通过尝试通信以及雷达系统中的高定位技术包括方向回溯技术等,快速实现目标的跟踪定位与能量传输,甚至可以采用能量传输与通信的异频同时工作或者分时同频工作等.针对 MPT 系统的微波泄露干扰问题,则可以通过特殊的副瓣电平综合技术或者是寻求对电磁干扰要求不高的工作场景来实现.关于微波对人类以及地球上生物的威胁问题,日本正在寻找大片森林区域布置 MPT 接收点进行实验验证.

微波输能技术作为一种特殊而通用的技术,其应用领域越来越广泛,如太阳能发电卫星、临近空间飞行器、微波驱动直升机、机器人供能及偏远地区的能量传输,甚至是智慧城市的多用途电子设备供电等.因此,针对大功率 MPT,建议制定三步走发展战略<sup>[67]</sup>:

第一步(10年):尝试多种频段的多场景微波输能共形技术研究,在地面建立中远距离的高功率微波输能实验平台,对各关键部件以及技术进行攻关.

第二步(10~20年):形成特定的微波输能标准包括可用频段,运用特定的 MPT 频段从地面对移动目标进行高功率微波输能实验;开拓出多种应用领域包括地-地、地-空、空-空能量传输,引导 MPT 技术的商用化发展.

第三步(20~30年,最终目标):实现地-地、地-空、空-空的微波输能网络构建,包括空间太阳能电站.

相信未来我国微波输能技术的研究必将极大促进国民经济的建设以及能源结构的改善.

### 参考文献

#### References

- [1] [http://image.baidu.com/search/detail?ct=503316480&z=&tn=baiduimage&ipn=d&word=%E7%A9%BA%E9%97%B4%E5%A4%AA%E9%98%B3%E8%83%BD%E7%94%B5%E7%AB%99&step\\_word=&ie=utf-8&in=&cl=2&lm=-1&st=-\[OL\]](http://image.baidu.com/search/detail?ct=503316480&z=&tn=baiduimage&ipn=d&word=%E7%A9%BA%E9%97%B4%E5%A4%AA%E9%98%B3%E8%83%BD%E7%94%B5%E7%AB%99&step_word=&ie=utf-8&in=&cl=2&lm=-1&st=-[OL])
- [2] 黄吉金,黄珊.微波能量传输技术及其应用发展方向[J].微波学报,2012,28(增刊2):485-490  
HUANG Jijin, HUANG Shan. Microwave power transmission technology and its application[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(sup2):485-490

- [ 3 ] Li L W. Wireless power transmission: State-of-the-arts in technologies and potential applications [ C ] // Asia-Pacific Microwave Conference, 2011: 86-89
- [ 4 ] 马海虹. 航天器间微波无线能量传输技术研究 [ J ]. 空间电子技术, 2013, 10(3): 57-60  
MA Haihong. Research on microwave wireless power transmission technology in aerospace [ J ]. Space Electronic Technology, 2013, 10(3): 57-60
- [ 5 ] Strassner B, Chang K. Microwave power transmission: Historical milestones and system components [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1379-1396
- [ 6 ] Brown W C. Experiments in the transportation of energy by microwave beam [ J ]. IRE International Convention Record, 1964, 12(2): 8-17
- [ 7 ] 刘长军, 李凯, 黄卡玛. 微波输能技术研究进展 [ C ] // 第十五届全国微波能应用学术会议论文集, 2011: 19-22  
LIU Changjun, LI Kai, HUANG Kama. Development of microwave power transmission study [ C ] // The 15th National Conference on Microwave Power Transmission, 2011: 19-22
- [ 8 ] Matsumoto H, Kimura T. Nonlinear excitation of electron cyclotron wave by a monochromatic strong microwave: computer simulation analysis of the MINIX results [ J ]. Space Solar Power Review, 1986, 6: 187-191
- [ 9 ] Schinohara N, Mitani T, Matsumoto H. Development of phase controlled magnetron (in Japanese) [ J ]. IEICE Trans C, 2001, J84-C (3): 199-206
- [ 10 ] Shinohara N, Matsumoto H, Hashimoto K. Solar power station/satellite (SPS) with phase controlled magnetron [ J ]. IEICE Transactions on Electronics, 2013, E86-C (8): 1550-1555
- [ 11 ] Matsumoto H, Hashimoto K, Shinohara N, et al. Experimental equipments for microwave power transmission in Kyoto University [ J ]. Proceedings of the 4th International Conference on Solar Power from Space, 2004, 567: 131-138
- [ 12 ] 冯桂荣. 微波无线能量传输系统的研究 [ D ]. 西安: 西安电子科技大学电子工程学院, 2014  
FENG Guirong. The research of microwave power transmission system [ D ]. Xi'an: School of Electronic Engineering, Xidian University, 2014
- [ 13 ] 杨雪霞. 微波输能技术概述与整流天线研究新进展 [ J ]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 770-779  
YANG Xuexia. Overview of microwave power transmission technology and recent progress of rectennas [ J ]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(4): 770-790
- [ 14 ] 李中云, 文舸一. Ka 波段整流天线的时域分析 [ J ]. 微波学报, 1998, 14(2): 134-141  
LI Zhongyun, WEN Geyi. Time domain analysis of Ka-band rectenna [ J ]. Journal of Microwaves, 1998, 14(2): 134-141
- [ 15 ] 华伟, 黄卡玛, 杨晓庆. 微波化学反应装置的微波能量传输方法与介质辐射器 [ P ]. 中国专利: CN200910058715.1, 2009-03-27  
HUA Wei, HUANG Kama, YANG Xiaoqing. Microwave energy transfer method and dielectric radiator for microwave chemical reaction device [ P ]. Chinese Patent: CN200910058715.1, 2009-03-27
- [ 16 ] 黄卡玛, 刘长军, 郭庆功. 一种多路注入锁定磁控管相干功率合成微波源 [ P ]. 中国专利: CN201310111478.7, 2013-04-02  
HUANG Kama, LIU Changjun, GUO Qinggong. A multi injection locked magnetron coherent power synthesis of microwave source [ P ]. Chinese Patent: CN201310111478.7, 2013-04-02
- [ 17 ] 徐长龙, 徐君书, 徐得名. 管道探测微机器人微波输能系统激励装置 [ J ]. 上海大学学报(自然科学版), 2000, 6(5): 404-406  
XU Changlong, XU Junshu, XU Deiming. The exciting device of microwave energy supply system for in-pipe inspect micromachine [ J ]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2000, 6(5): 404-406
- [ 18 ] 王业清, 杨雪霞, 江超. 整流天线组阵等效模型分析与实验 [ J ]. 上海大学学报(自然科学版), 2013, 19(3): 266-270  
WANG Yeqing, YANG Xuexia, JIANG Chao. Equivalent models and experiments of rectenna arrays [ J ]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2013, 19(3): 266-270
- [ 19 ] 郭根武. 微波无线能量传输地面演示系统研究 [ D ]. 西安: 西安邮电大学电子工程学院, 2015  
GUO Genwu. The research of microwave power transmission ground demonstration system [ D ]. Xi'an: School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, 2015
- [ 20 ] Kobayashi Y, Hori M, Noji H, et al. The S-band GaN-based high power amplifier and rectenna for space energy transfer applications [ J ]. IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, 2012: 271-274
- [ 21 ] Li Y, Jandhyala V. Design of retrodirective antenna arrays for short-range wireless power transmission [ J ]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60(1): 206-211
- [ 22 ] Rodenbeck C T, Li M Y, Chang K. A phased-array architecture for retrodirective microwave power transmission from the space solar power satellite [ J ]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2004, 3: 1679-1682
- [ 23 ] Hsieh L H, Strassner B H, Kokel S J, et al. Development of a retrodirective wireless microwave power transmission system [ C ] // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003, 2: 393-396
- [ 24 ] Rodenbeck C T, Chang K. A limitation on the small-scale demonstration of retrodirective microwave power transmission from the solar power satellite [ J ]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2005, 47(4): 67-72
- [ 25 ] Mcspadden J O, Mankins J C. Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology [ J ]. IEEE Microwave Magazine, 2002, 3(4): 46-57
- [ 26 ] Massa A, Oliveri G, Viani F, et al. Array designs for long-distance wireless power transmission: State-of-the-art and innovative solutions [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1464-1481

- [27] Jamnejad V, Hoorfar A. Optimization of antenna beam transmission efficiency [C] // IEEE Antennas & Propagation Society International Symposium, 2008; 5-11
- [28] Sanzgiri S T, Butler J K. Constrained optimization of the performance indices of arbitrary array antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1971, 19(4): 493-498
- [29] Takahashi T, Mizuno T, Sawa M, et al. Development of phased array for high accurate microwave power transmission [C] // IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, 2011; 157-160
- [30] Ishiba M, Ishida J, Komurasaki K, et al. Wireless power transmission using modulated microwave [C] // IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, 2011; 51-54
- [31] Kaya N, Iwashita M, Mankins J C. Hawaii project for microwave power transmission [C] // 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, 2003; 163-168
- [32] Kaya N, Iwashita M, Little F, et al. Microwave power beaming test in Hawaii [C] // Proceedings of the 60th International Astronautical Congress, 2009, 8; 6128-6132
- [33] Kaya N, Mankins J. The second microwave power beaming experiment in Hawaii [J]. Proceedings of the 61st International Astronautical Congress, 2010, 12; 9702-9707
- [34] Kawasaki S. Microwave WPT to a rover using active integrated phased array antennas [C] // Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, 2011; 3909-3912
- [35] Mcspadden J O, Yoo T, Chang K. Theoretical and experimental investigation of a rectenna element for microwave power transmission [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(12): 2359-2366
- [36] Mcspadden J O, Mankins J C. Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology [J]. IEEE Microwave Magazine, 2002, 3(4): 46-57
- [37] Jamnejad V, Hoorfar A. Optimization of antenna beam transmission efficiency [J]. IEEE Antennas & Propagation Society International Symposium, 2008, DOI: 10.1109/APS.2008.4619365
- [38] Ren Y J, Chang K. 5.8 GHz circularly polarized dual-diode rectenna and rectenna array for microwave power transmission [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1495-1502
- [39] Ren Y J, Chang K. New 5.8 GHz circularly polarized retrodirective rectenna arrays for wireless power transmission [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(7): 2970-2976
- [40] Zbitou J, Latrach M, Toutain S. Hybrid rectenna and monolithic integrated zero-bias microwave rectifier [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(1): 147-152
- [41] Kang Z Y, Lin X Q, Jiang Y. A series-parallel rectifier with an inductance loaded for wireless power transfer [C] // IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, 2015, DOI: 10.1109/APMC.2015.7413180
- [42] Strassner B, Chang K. 5.8 GHz circularly polarized dual-rhombic-loop traveling-wave rectifying antenna for low power-density wireless power transmission applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(5): 1548-1553
- [43] Huang F J, Yo T C, Lee C M, et al. Design of circular polarization antenna with harmonic suppression for rectenna application [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11; 592-595
- [44] Kang Z Y, Lin X Q, Tang C, et al. 2.45 GHz wideband harmonic rejection rectenna for wireless power transfer [C] // International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2016, DOI: 10.1017/S1759078716001082
- [45] Liou C Y, Lee M L, Huang S S, et al. High-power and high-efficiency RF rectifiers using series and parallel power-dividing networks and their application to wirelessly powered devices [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(1): 616-624
- [46] Song C Y, Huang Y, Carter Paul, et al. A novel aix-band dual CP rectenna using improved impedance matching technique for ambient RF energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(7): 3160-3171
- [47] 康湛毓. 2.45 GHz 高效率微带整流天线的研究 [D]. 成都: 电子科技大学电子信息工程学院, 2016  
KANG Zhanyu. The research of 2.45 GHz high efficiency microstrip rectenna for microwave power transmission [D]. Chengdu: School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2016
- [48] Zbitou J, Latrach M, Toutain S. Hybrid rectenna and monolithic integrated zero-bias microwave rectifier [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(1): 147-152
- [49] Ali M, Yang G L, Dougal R. A new circularly polarized rectenna for wireless power transmission and data communication [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4(1): 205-208
- [50] Strassner B, Chang K. Highly efficient c-band circularly polarized rectifying antenna array for wireless microwave power transmission [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(6): 1347-1356
- [51] Ren J Y, Chang K. 5.82 GHz circularly polarized dual-diode rectenna and rectenna array for microwave power transmission [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1495-1502
- [52] Chin C K, Xue Q, Chan C H. Design of a 5.82 GHz rectenna incorporating a new patch antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4(1): 175-178
- [53] Heikkinen J, Kivikoski M. Low-profile circularly polarized rectifying antenna for wireless power transmission at 5.8 GHz [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(4): 162-164
- [54] Olgun U, Chen C C, Volakis J L. Investigation of rectenna

- array configurations for enhanced RF power harvesting [J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011,10(1):262-265
- [55] Shinohara N,Matsumoto H.Dependence of dc output of a rectenna array on the method of interconnection of its array elements [J]. Electrical Engineering in Japan, 1998,125(1):9-17
- [56] Shinohara N,Matsumoto H.Experimental study of large rectenna array for microwave energy transmission [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998,46(3):261-268
- [57] Matsunaga T,Nishiyama E,Toyoda I.5.8 GHz stacked differential mode rectenna suitable for large-scale rectenna arrays [J].Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings,2013,14(6):1200-1202
- [58] Sakamoto T,Ushijima Y,Nishiyama E,et al.5.8 GHz series/parallel connected rectenna array using expandable differential rectenna units [J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2013,61(9):4872-4875
- [59] Nishida K,Taniguchi Y,Kawakami K,et al.5.8 GHz high sensitivity rectenna array [J].IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission:Technologies,Systems,and Applications,2011:19-22
- [60] Chung D N, Hoang N H, Lam H T, et al. Simulation, design and fabrication of 4-element and 32-element rectenna array applying in the wireless power transmission [J].International Conference on Advanced Technologies for Communications,2015:522-527
- [61] Almoneef T S, Sun H, Ramahi O M. A 3D folded dipole antenna array for far-field electromagnetic energy transfer [J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016,15:1406-1409
- [62] Ferreira D, Sismeiro L, Ferreira A P P A, et al. Hybrid FSS and rectenna design for wireless power harvesting [J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016,64(5):2038-2042
- [63] Dickinson R M. Performance of a high-power, 2.388 GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km [C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1976:139-141
- [64] Matsumoto H, Kaya N, Fujita M, et al. Microwave lifed airplane experiment with active phased array antennas [R].MILAX Report, Kyoto University, 1995
- [65] Mcspadden J O, Little F E, Duke M B, et al. An in-space wireless energy transmission experiment [C]// Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1996,1:468-473
- [66] Youn D G, Park Y H, Kim K H, et al. A study on the fundamental transmission experiment for wireless power transmission system [C]// Proc of the IEEE Region 10 Conference, 1999,2:1419-1422
- [67] Shinohara N, Kawasaki S. Recent wireless power transmission technologies in Japan for space solar power station/satellite [C]// IEEE Radio and Wireless Symposium, 2009:13-15

## Research progress and development trend of microwave energy transfer technology

LIN Xianqi<sup>1</sup> XU Dongdong<sup>1</sup> ZENG Jiangjie<sup>1</sup> FAN Yong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731

**Abstract** Microwave power transmission (MPT) technology is one way to realize long-distance energy transmission. It is also the key technology of the space solar power system (SSPS). In this paper, the research status of microwave power transmission at home and abroad is introduced. The system composition and key technology of microwave power transmission are analyzed. The microwave transmitting subsystem and the microwave receiving subsystem are discussed in detail. Finally, the existing problems and the future development trend of microwave power transmission are summarized.

**Key words** microwave power transmission (MPT); space solar power system (SSPS); microwave transmitting subsystem; microwave receiving subsystem