



# 整流天线研究进展及设计方法概述

## 摘要

微波输能(MPT)技术通过微波波束在两点之间进行能量的无线传输,可用于太阳能卫星、近空间飞行器、无线传感器等.整流天线将微波能量捕获并转换为直流,是MPT系统的关键部件.首先,从拓展工作频带、输入功率范围和负载范围等方面对整流天线最新研究进展进行概述,然后分析了其核心器件整流电路的拓扑结构及相应适用场合,对有效设计整流天线的步骤进行综合,最后分析了整流天线技术存在的问题,并指出了MPT技术未来的发展方向.

## 关键词

整流天线;整流电路;整流效率;天线;微波输能

中图分类号 TN011

文献标志码 A

## 0 引言

微波输能(Microwave Power Transmission, MPT)概念由尼古拉·特斯拉在1891年提出.20世纪60年代,由于大功率微波源的逐渐成熟和微波整流二极管性能的提高,使得MPT系统中发射源和接收整流天线效率得以保证,美国开始MPT技术研究.雷声公司Spencer实验室在1964年完成了微波驱动直升飞机的实验<sup>[1]</sup>,1974年,喷气推进实验室(JPL)在1.72 m的距离获得54%的“直流-直流”系统效率<sup>[2]</sup>,但是在1.54 km的远距离,系统效率只有6.7%<sup>[3]</sup>,直至目前,公开报道的远距离输能系统效率基本在这一数量级.80年代以后,加拿大、日本等国面向近空间通信作业平台和太阳能卫星应用相继展开了MPT技术研究<sup>[4]</sup>,2010年以来,环境电磁能量回收引起了各界关注<sup>[5]</sup>.整流天线及阵列是MPT系统的关键技术之一.

整流天线由接收天线和整流电路组成,如图1所示.微波整流二极管工作于大信号非线性状态,产生的高次谐波可能会被天线辐射,造成能量的损失,谐波是影响整流效率的主要因素之一;微波整流二极管输入阻抗与输入功率和工作频率相关,二极管输入阻抗的匹配是影响效率的另一主要因素.因此,在二极管输入端设计低通/带通滤波器/阻抗匹配网络,根据天线和阻抗匹配网络的性质,某些情况下可以省去输入端滤波器.输出端接直通滤波器,不仅将基波反射回二极管再次整流,而且滤除基波和高次谐波,使得输出直流更为稳定. $R_L$ 是直流收集负载.

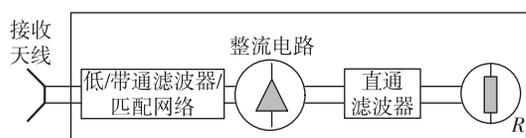


图1 整流天线组成

Fig. 1 Components of a rectenna

收稿日期 2016-11-23

资助项目 国家自然科学基金(61271062)

作者简介

杨雪霞,女,博士,教授,主要研究方向为天线理论与技术、微波输能技术及计算电磁场. yang.xx@shu.edu.cn

<sup>1</sup> 上海大学 通信与信息工程学院,上海, 200072

整流电路的核心指标是“微波-直流”(Microwave-Direct Current, MW-DC)转换效率,它与输入的微波功率、工作频率和所接负载有关.整流电路一般采用反应迅速、导通电压低的肖特基二极管,在普通微波波段,整流天线(电路)在固定工作频率、输入功率和优化负载上,MW-DC效率可以达到80%以上<sup>[6]</sup>.为了扩展整流天线功能和适应性,

一些学者研究了双/多/宽频整流天线、宽输入功率动态范围整流天线、负载无关整流天线等.毫米波频段系统具有体积小、质量轻等优点,但是普通微波波段整流电路的设计方法在毫米波基本不能使用.本文对拓展整流天线性能和毫米波整流天线研究进展进行概述,分析整流电路拓扑结构及其相应适用场合,对整流天线设计方法进行综合,最后指出 MPT 技术未来的研究方向.

## 1 整流天线研究进展

接收天线的作用是保证电路接收到足够的微波能量.如果天线具有谐波抑制功能,则可以省去二极管输入端的滤波器,这样不仅使得整流天线结构紧凑,而且免去了滤波器的插入损耗.整流电路 MW-DC 效率与工作频率、输入功率和负载相关,整流天线的研究工作基本上从突破这一限制展开.

### 1.1 多/宽频整流天线

利用微波传输线在不同频率处具有不同电长度和特征性阻抗的性质,通过适当调节阻抗匹配网络的几何尺寸,可以实现多频段内的阻抗匹配.常用的阻抗匹配网络有双 T 型、多枝节型、十字型等.

美国 Texas A&M 大学 K.Chang 教授课题组最早展开双频整流天线研究,于 1998 年提出双频半波振子整流天线<sup>[7]</sup>,在 2.45/3.3 GHz 频点的整流效率分别为 85% 和 1%.在第二个频点的效率太低,其主要原因在于部分整流电路采用了集总元件,接收天线是对称振子.2002 年,他们将平面印刷技术(Printed Circuit Board, PCB)用于整个整流电路设计<sup>[8]</sup>,基于 CPS 传输线设计的整流电路与印刷偶极子直接集成,当输入功率为 89 mW 时,整流天线在 2.45/5.8 GHz 频率上的最高效率分别为 84.4% 和 82.7%.2007 年,该课题组报道了一种小型化的用于 RFID 的 2.45/5.8 GHz 双频整流天线<sup>[9]</sup>,接收天线采用弯曲槽环式结构,比一般的槽环式天线尺寸减少了 52%,在整流电路输入功率为 200 mW 时,整流效率分别为 65% 和 46%.

此后其他研究机构在双/多频整流天线和整流电路的研究主要集中在适用于低功率密度场合,即环境电磁能量收集方面,如降低二极管输入功率<sup>[10-12]</sup>,通过天线阵来提高接收能量<sup>[13]</sup>,包含 3 个及以上无线通信频段等方面<sup>[14-19]</sup>.图 2 是上海大学设计的一种十字枝节微带线型整流电路<sup>[11]</sup>,10 dBm 输入功率时,在 1.8/2.2 GHz 频率上 MW-DC 测试转

换效率分别为 50% 和 54%.采用集总元件代替微带枝节构成的阻抗匹配网络同样能实现双频工作<sup>[12]</sup>,其优点是匹配网络的尺寸大大减小,缺点是引入集总元件造成损耗增加,整流效率下降.图 3 是新加坡国立大学设计的一副工作在 1.8/2.15 GHz 的双频整流天线<sup>[13]</sup>,接收天线采用 1×4 的宽带八木天线阵以接收更多能量,整流电路双频工作用 2 个串联的 T 型微带枝节实现,当输入功率为 -18 dBm 时,整流天线在 2 个工作频点效率均可达 35% 以上.CPS 构成的整流电路也能进行双频整流<sup>[20]</sup>.CPS 传输线结构简单,便于实现无源和有源器件的跨接,避免过孔造成的寄生效应.然而,CPS 结构很难在更多的频段内实现阻抗匹配,不易设计三频以上的整流电路.

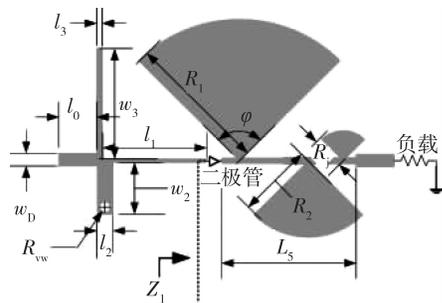


图 2 十字枝节 1.8/2.2 GHz 整流电路<sup>[11]</sup>

Fig. 2 1.8/2.2 GHz rectifying circuit with a cross stub



图 3 基于八木天线阵的 1.8/2.15 GHz 整流天线<sup>[13]</sup>

Fig. 3 1.8/2.15 GHz rectenna with Yagi array

三频以上整流电路一般用多支路方法实现,即

每条支路对应一个频段<sup>[14-16]</sup>.文献[14]所设计的三频倍压式整流电路,在940 MHz和1.950/2.44 GHz频率上,整流效率分别为80%、47%和43%,其相应的输入功率分别为10、8和16 dBm.文献[16]所提出的四频倍压式整流电路工作原理与之相似.叠加式整流支路造成电路结构的复杂化,且元件增多会造成电路体积增大,损耗增加,这种方法比较适合于集成度高的CMOS工艺.利用复合左右手超材料,使电路在2个频率分别表现出左手和右手特性,也可用于双频和三频整流电路设计<sup>[17,21]</sup>.文献[17]提出的基于符合左右手材料的三频整流电路具有较大的带宽,在0.5~1.0、1.5~2.0和2.3~3.6 GHz 3个频段内,当输入功率为27 dBm时,电路最高整流效率可达55%.

目前对宽频整流天线研究报道很少,原因在于虽然天线的宽带特性比较容易实现,但是有源整流电路的宽带特性不易在一个电路中设计.2004年,美国科罗拉多州立大学的Joseph A.Hagerty介绍了一种宽频低功率密度整流天线阵列<sup>[18]</sup>,接收天线单元为宽带平面螺旋天线,整流天线直接由天线和二极管组成,没有阻抗匹配网络,所以效率很低,在2~18 GHz频带内,整流效率在0.1%~20%范围.2013年,西班牙Collado等<sup>[19]</sup>提出了一种太阳能和电磁能混合能量收集系统,设计了宽频和双频2种整流天线.接收天线采用宽频印刷单极子,可覆盖800 MHz~6 GHz频率范围;整流电路采用单个二极管串联型结构,利用宽频阶跃阻抗匹配网络,在0.8~2.5 GHz频带范围内转换效率约为8%.可见宽频整流天线效率都很低.

## 1.2 宽输入功率动态范围整流天线

具有宽输入功率整流天线的关键是整流电路在一个宽输入功率动态范围内具有基本相同的高效MW-DC转换效率.CMOS工艺可将多个电路元件集成在很小尺寸上,通过功率检测器、逻辑比较器、单刀多掷开关等数字元件,能够设计宽输入功率动态范围整流电路.CMOS宽输入功率整流电路一般有3种形式:在多条整流支路的基础上实现可重构<sup>[22-24]</sup>、采用智能稳压器<sup>[25]</sup>、双整流单元的串并联可重构<sup>[26-29]</sup>.

多支路可重构整流电路即每条支路适用于一个输入功率范围,功率检测器检测出输入的信号,逻辑比较器比较其大小,开关选择合适的整流支路,以此拓宽输入功率工作范围.文献[22]介绍的0.18  $\mu\text{m}$

CMOS工艺制造的可重构整流电路,工作在0.8~2.5 GHz频段,整流电路由4条适用于不同输入功率的整流支路组成,在-4~30 dBm的动态功率范围内,整流效率都高于50%.文献[25]提出了一种低宽功率130 nm CMOS工艺整流电路,其智能稳压器类似于经典的电流反射镜结构,使输出电压保持稳定,不受输入功率影响.电路工作频率868 MHz,采用两级Dickson电荷泵结构,在-12~1 dBm的输入功率范围内整流效率高于30%.双整流单元的串并联可重构整流电路,2个整流单元串联时适用于高输入功率,并联时适用于低输入功率范围,从而能拓宽输入功率工作范围.2014年,文献[29]发表了一种工作在2.4 GHz的可重构整流电路,串并转换由2个控制信号决定,实验测得整流电路在输入功率为2.1和8.9 dBm处有2个效率峰值,分别为41%和47%.

目前,采用PCB工艺实现的宽输入功率整流电路很少.2013年,Sun等<sup>[30]</sup>提出了一种自适应可重构的宽输入功率PCB整流电路,采用2种不同型号的肖特基二极管分别适用于低和高输入功率范围,引入场效应管(FET)作为自适应开关,整流电路工作频率为100 MHz,在-14~21 dBm的输入功率范围内,功率转换效率都高于50%.上海大学在输入功率自适应方面也做了相关研究<sup>[31-33]</sup>.图4是文献[34]提出的涵盖GSM-900、CNSS、UMTS-2100、WiFi和蓝牙5个无线通信系统的四频功率自适应整流电路,效率峰值为57.0%,在-12~12 dBm的输入功率范围内各频段的整流效率均大于30%.

分析比较CMOS和PCB这2种工艺,可以发现采用CMOS工艺整流电路尺寸相对较小,宽输入功率整流电路用多分枝结构实现;PCB工艺制造的整流电路结构简单,通过阻抗匹配网络能够实现多频工作,但尺寸相对较大.

## 1.3 负载无关整流天线

由于二极管的非线性,整流电路有一个最高效率的优化负载值,偏离优化值时整流效率会下降,这给实际应用造成不便.为了拓宽整流电路的负载工作范围,目前比较成熟的是采用DC-DC变换器的方法.日本京都大学的课题组提出一种降压-升压变换器结构<sup>[34-35]</sup>,其元件包括功率开关、电感、续流二极管和电容,开关受高、低频2个脉冲控制.它工作在电流非连续导通模式,二极管输入阻抗只与电感值和控制开关的脉冲有关,而与负载值无关,因而可以实现在宽负载范围内工作.实验结果表明,当负载为

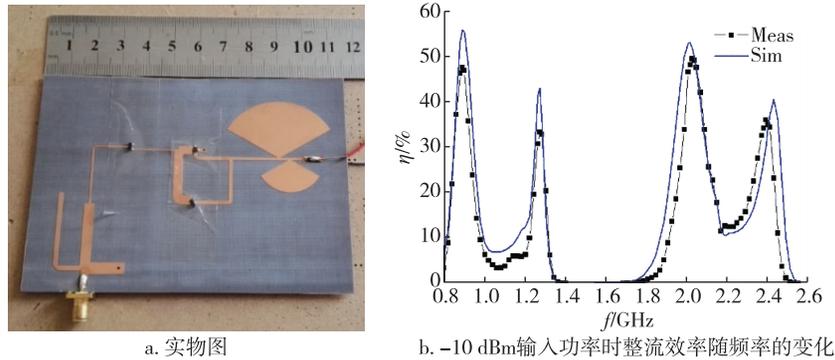


图4 四频功率自适应整流电路

Fig. 4 Four-band power adaptive rectifying circuit, (a) circuit picture, and (b) rectifying efficiency versus frequency at input power of  $-10$  dBm

100~5 000  $\Omega$  时,整流电路的转换效率几乎稳定在75%,与其最大功率点十分接近.

#### 1.4 毫米波整流天线

相对于普通微波波段,毫米波整流天线具有体积小、质量轻的优点,在有限口径条件下,波束窄、传输效率高,近年来成为MPT技术的一个重要的研究方向.早在1988年,Koert等<sup>[36]</sup>就基于高空微波平台开发,设计了35 GHz整流天线,在100 mW/cm<sup>2</sup>的功率密度下整流效率计算值约为72%.1991年开始,Chang课题组展开毫米波整流天线研究<sup>[37-41]</sup>,所设计的CPS型印刷偶极子和微带线型贴片整流天线,当输入功率在50~120 mW范围内时,整流效率最高为39%.为了用于低功率密度场合,文献[41]中接收天线采用二元阵,在输入功率密度30 mW/cm<sup>2</sup>时,整流天线效率为35%.

文献[42]设计了工作于35/94 GHz 2个大气窗口的双频整流天线,整流二极管采用CMOS工艺加工制作,在CPW上跨接2个整流二极管,实现全波整流,在30 mW/cm<sup>2</sup>的功率密度下,2个频率上的整流效率分别为53%和37%.为了能够适应低输入功率场合的应用,Wu教授等<sup>[43]</sup>于2015年设计了35 GHz倍压型整流电路,在倍压二极管整流后端再引入一个二极管D3,用以收集谐波能量,当输入功率为20 mW时,整流效率为34%.国内东南大学洪伟教授研究团队在国内最先开展了Ka波段整流天线的研究<sup>[44]</sup>,用高串联阻抗硅基肖特基二极管验证了基于SIW技术的整流器的可行性,接收天线采用SIW馈电渐变槽天线,当工作频率为30 GHz,输入功率为79.4 mW时,整流电路在240  $\Omega$ 负载上得到27.4%的最高转换效率.

相比于普通微波波段,目前毫米波段的整流天线测试整流效率较低.其原因主要在于传统整流二极管分析理论公式和仿真软件在毫米波段误差很大,二极管输入阻抗不能准确确定,给匹配网络的设计带来很大困难.最近上海大学在35 GHz整流天线和阵列方面取得一些进展<sup>[45-47]</sup>.文献[45]利用等效电路模型理论分析了肖特基二极管在Ka波段的整流特性,设计并加工电路,如图5所示,在20 dBm输入功率时,整流电路效率57%,但是产生2.5 GHz的频偏;然后提出实验改进方案,且利用SIW技术实现毫米波段整流天线和阵列.图6是文献[47]设计的Vivaldi整流天线单元:当功率为18 dBm时,整流效率为52.8%,且具有宽频和宽波束的特点,当接收天线输入功率为10 dBm时,整流效率大于30%的绝对带宽2 GHz,在 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 的入射波范围内,最小输出电压均在最大电压的0.8倍以上,可获得较为稳定的直流输出电压.图7a给出了整流天线二元阵效率及输出功率随输入功率密度的变化曲线,当功率密度为26.5 mW/cm<sup>2</sup>时,并联二元阵、串联二元阵以及单元的输出直流功率分别为17.28、17.36和9.45 mW,整流效率分别为43.3%、43.5%和47.4%.二元阵的输出直流功率约为单元的2倍,2个阵列的整流效率基本一致,略低于单元的整流效率,主要由测试误差所引起.当功率密度为10 mW/cm<sup>2</sup>时,二元阵输出的直流功率约为7.3 mW.从图7b可以看出并联和串联二元阵与单元的输出电压比值分别为0.93和1.92,基本符合理论结果1.0,阵列的线性度较好.

## 2 整流电路拓扑结构

平面印刷天线作为各类无线通信系统的关键部

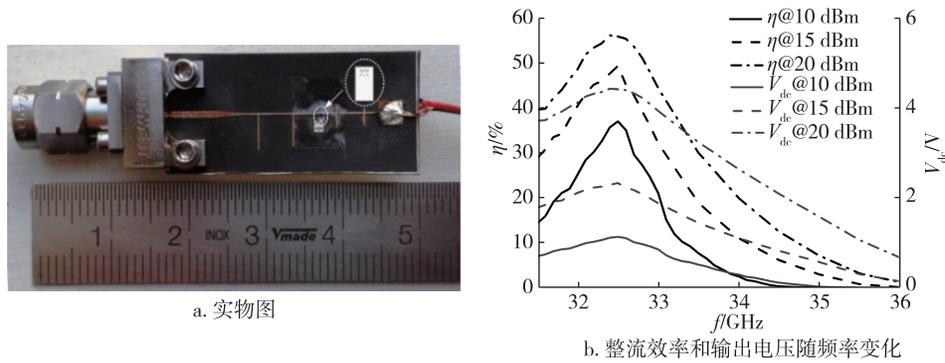


图5 35 GHz 并联型整流电路

Fig. 5 35 GHz rectifying circuit with diode parallel topology, (a) circuit picture, and (b) rectifying efficiency and output DC voltage versus frequency

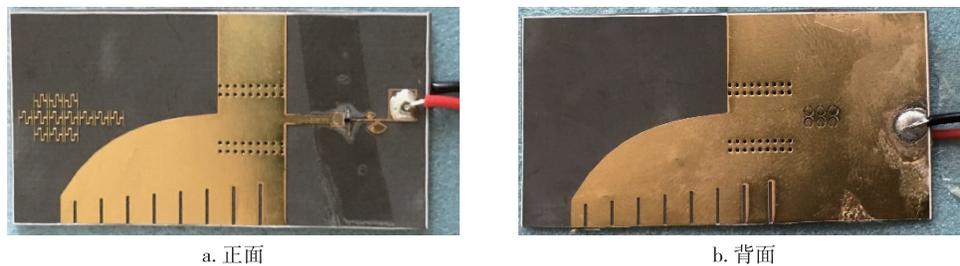


图6 35 GHz Vivladi 整流天线单元实物

Fig. 6 Front(a) and back(b) pictures of 35 GHz Vivladi rectenna

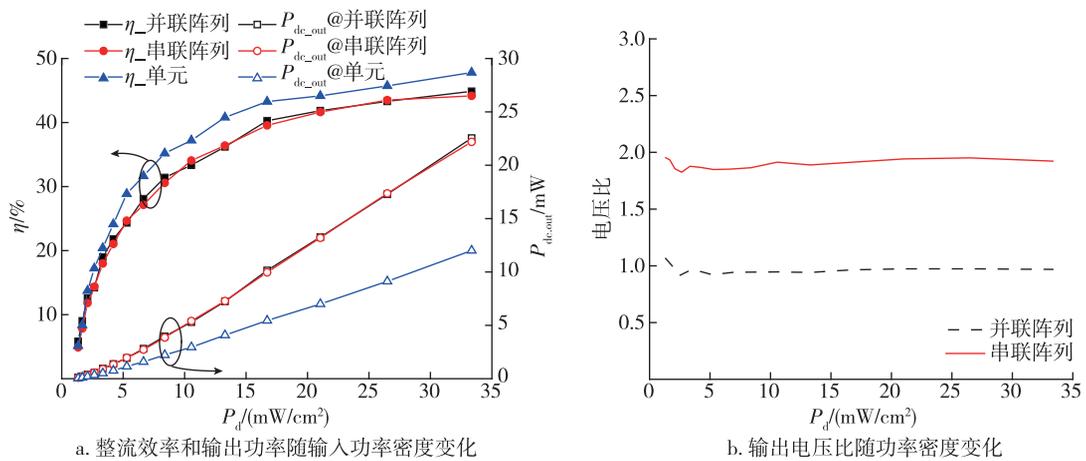


图7 Vivladi 整流天线二元阵测试曲线

Fig. 7 Measured results of 2-element Vivladi rectenna array, (a) rectifying efficiency and output power versus power density, and (b) output voltage ratio versus power density

件,其多频、宽带、高增益和多极化等性能已有丰富的研究成果,整流天线高转换效率及其功能扩展,主要依赖于整流电路.下面对整流电路及其功能提升的拓扑结构和相应适用范围进行比较、论述.

## 2.1 整流电路基本拓扑结构

按二极管的连接方式不同,整流电路的基本拓扑结构有5种:二极管串联型、并联型、倍压型、倍流型和桥式整流电路,如图8所示.

单个二极管串/并联型整流电路拓扑结构简单,

应用广泛.这 2 种结构整流电路中二极管的导通损耗最小,整流效率较高.一般商用肖特基,输入功率为-10、20 dBm 时效率分别可达 50%、80% 以上.但是单二极管整流电路的输出直流能量小、电压低,不一定能够满足需求.倍压型整流电路通过电容上的电荷积累效应来产生高电压,倍流型整流电路则是通过电感实现高输出电流,分别适合于高直流电压和电流需求的场合.目前,对倍压整流电路的研究比较多,倍压阶数对电压增益和整流效率的影响较大.随着阶数的增加,输出电压和整流效率随之增加,对应的输入功率向高处偏移,即在不同输入功率等级下,对应的最优阶数不同.桥式拓扑结构属于全波整流,要求二极管具有高反向击穿电压,并且正/负半波都需要克服 2 个二极管的阈值电压,因此桥式整流电路一般在高输入功率条件下获得高整流效率,也可在低输入功率条件下提供高输出电压.

### 2.2 功能扩展整流电路拓扑结构

整流天线的多/宽频和宽输入功率动态范围特性主要由整流电路决定.实现整流电路多/宽频特性和宽输入功率动态范围整流电路拓扑结构,有单支路和多支路 2 种(图 9).

单支路多/宽频整流电路通过阻抗匹配网络来实现,拓扑结构如图 9a 所示,整流电路拓扑结构可以是上述提到的 5 种方式.利用微波传输线在不同频率上具有不同电长度和特性阻抗,通过调节匹配枝节的尺寸,来实现多/宽频特性.这种拓扑结构适用于 PCB 工艺来实现.图 9b 是多支路拓扑结构,即利用多条支路分别对各个频段的电磁能量整流,然后将直流能量集中于负载而进行收集.多支路拓扑结构适用于 CMOS 集成电路工艺,虽然有多个支路,但是 CMOS 工艺的高集成度,即使在 UHF、L 波段,整流电路面积也很小.多支路拓扑结构亦可用 PCB

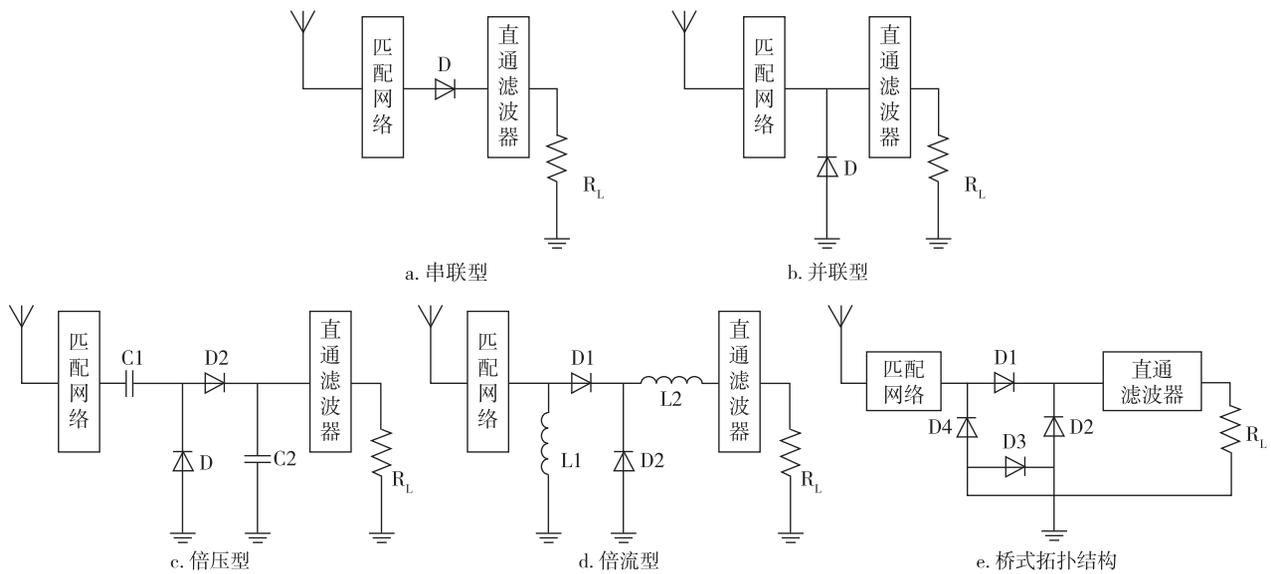


图 8 整流电路拓扑结构

Fig. 8 Topological structures of rectifying circuits, (a) series, (b) parallel, (c) voltage doubling, (d) current doubling, and (e) bridge

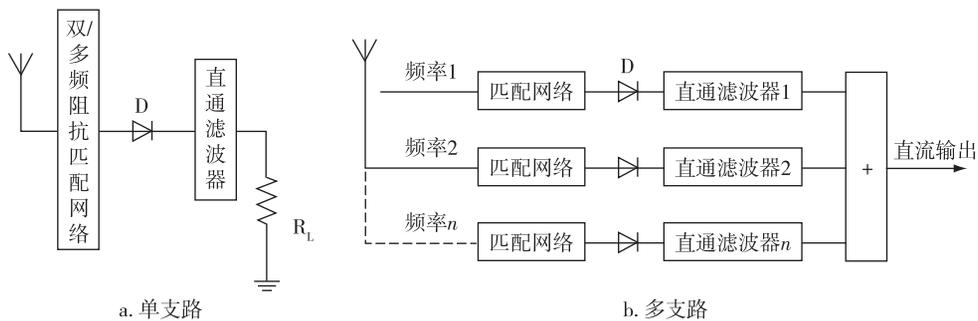


图 9 多/宽频整流电路拓扑结构

Fig. 9 Topological structures of multiple/broad-band rectifying circuits, (a) single branch, and (b) multi-branch

工艺实现,在较低的微波波段可采用集总元件设计直通滤波器和输入阻抗匹配网络,以减小电路尺寸,但会损失部分效率.

宽输入功率范围单支路整流电路拓扑结构有基于 FET 和基于 pHEMT(栅调制掺杂异质结场效应管)2种,如图 10 所示.基于 FET 单支路结构中,将场效应管作为开关,控制具有不同导通电压的整流二极管, D1、D2 分别适用于低、高输入功率, FET 与 D2 并联.当输入功率较低时, FET 导通, D2 被短路,只有 D1 工作;当输入功率较高时, FET 断开, D1 和 D2 串联共同工作,从而拓展了输入功率范围.基于 pHEMT 单支路结构中,将场效应管与二极管视为一整体,利用 pHEMT 来保护二极管,整体的启动电压与二极管的启动电压基本一致,整体的反向击穿电压相较于二极管本身反向击穿电压要大,数值上等于场效应管栅漏极间最大击穿电压,从而达到拓宽输入功率范围的目的.

宽功率多支路整流电路拓扑结构与多/宽频的类似,设计不同的支路,每条支路适用于不同输入功率范围,对于 CMOS 技术,一般要加入功率检测器、逻辑比较器、单刀多掷开关等数字元件,然后将微波输入不同功率的整流电路;对于 PCB 工艺,可采用功分的方式,分成若干条支路,分别适应不同功率的整流.

### 3 整流天线设计方法

整流天线的设计需要首先考虑使用环境,为了节省空间和减小质量,整流天线一般附着于用电设备表面,因此采用具有低剖面的 PCB 或 CMOS 技术.

#### 3.1 整流天线的传输线考虑

为了便于集成和阻抗匹配,整流电路的传输线与接收天线的馈线一般采用相同类型.按照传输线形式来分,整流天线有微带线型、共面波导(CoPlanar Waveguide, CPW)型和共面带状线(Co-

Planar Stripline, CPS)型,在普通微波波段,这 3 种类型整流电路的 MW-DC 转换效率都达到 80% 以上,但是各具特点.

微带线型整流电路有 3 个优点:1) 相同特性阻抗的传输线,微带线的宽带相对小,在整流天线组阵过程中可弯折,因此设计灵活,可实现小型化;2) 容易用“T”形枝节、十字枝节等设计多频阻抗匹配网络;3) 在普通微波波段,当前的各种商业微波电路软件设计精度足够.但微带线型整流电路中需孔化接地,易带来寄生效应.CPS 型和 CPW 型整流天线结构简单,易组阵,片状元件可直接跨接在传输线上,无需金属过孔,避免了穿孔带来的寄生效应和工艺麻烦;但 CPS 和 CPW 馈电天线的增益、极化、带宽等性能的提升一般以牺牲体积为代价.CPW 传输线色散特性优于微带线和 CPS.另外, CPS 接收天线和整流电路无法直接测量,需设计巴伦,目前的商用软件不能使用,只能用理论公式和实验方法.

#### 3.2 整流天线设计步骤

基于目前可用分析方法,总结整流天线设计步骤如下:

1) 根据实际需求,明确负载值、所需的输出直流功率、输出电压和电流,以此初步设计整流天线组阵形式,阻值、电压、电流和功率满足一般电路理论.

2) 由工作频率、反向击穿电压和导通电压的要求选择微波整流二极管,确定二极管输入阻抗值.在 10 GHz 以下频段可用理论公式<sup>[37]</sup>和微波电路仿真软件,如 ADS、Designer 等,也可用实验方法测试<sup>[48]</sup>;毫米波段可用理论公式做初步估计,然后用实验方法准确确定二极管输入阻抗<sup>[46]</sup>.

3) 分析整流二极管得到最大转换效率时所需要的输入功率,商用肖特基二极管的理论和仿真效率一般都在 80% 以上.根据发射系统的功率和发射天线增益及传输距离,确定接收天线增益,从而设计天线或天线阵.

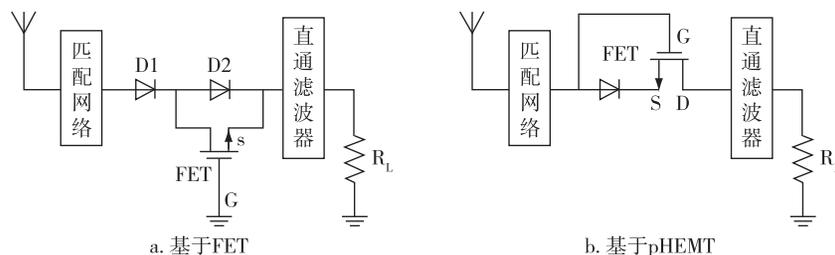


图 10 宽输入功率范围单支路整流电路拓扑结构

Fig. 10 Topological structures of wide input power range rectifying circuits with FET(a) or pHEMT(b)

4) 设计天线和二极管之间的阻抗匹配网络或输入低通滤波器.低通滤波器的功能也可以在接收天线上实现,即设计具有谐波抑制功能的接收天线.

5) 设计输出直通滤波器.可用多级扇形开路枝节或者集总元件实现,前者差损小,输出直流稳定,但是体积大;后者反之.

#### 4 总结与展望

在太阳能卫星、近空间浮空器、无人机、无线传感器网络等应用推动下,作为微波输能系统的关键技术,整流天线成为当前的研究热点,并且取得了一些成果,但同时存在以下问题:

1) 从整流电路转换效率上看,在 20 世纪 90 年代以后很多文献中的效率要低于早期的报道.其原因在于,60 年代 Brown 博士所用的二极管是专门为高功率高转换效率而设计的,而后期的设计大部分使用商用肖特基二极管,其功率容量低.

2) 从研究方法上来看,二极管非线性特性理论分析一直沿用 1992 年 K.Chang 教授等提出的输入阻抗和整流效率计算公式,这组公式的推导忽略了二极管理想系数、伏安特性等自身参数,从而造成在毫米波段计算误差很大,不再适用.

3) MPT 系统中需要整流天线与发射天线极化和方向对准,否则,系统效率将大大降低.研究者提出回溯天线阵、信标等方法来解决方向对准的问题,但是系统复杂度增大,极化和方向对准问题给远距离 MPT 技术实施造成障碍.

综上所述,未来微波输能技术研究方向主要包括以下几方面:

1) 微波整流二极管的理论研究.二极管输入阻抗随工作频率、输入功率以及负载而变化,输入阻抗是设计整流电路的关键参量,所以应该建立不同工作条件下严格的二极管等效电路模型,分析包含二极管准确特性的输入阻抗和整流效率计算公式.另一方面,针对高功率和低微功率整流应用,应提出对二极管特性的需求,研制适用于不同环境的专用高效整流二极管.

2) 能量和信息并行传输.随着移动通信、物联网技术的迅猛增加,终端用户和无线传感器节点需要随时随地高速接入无线网络;同时,无线技术的发展,使得环境中充满着丰富的电磁波,将这些电磁能量回收利用可节约能源,符合社会可持续发展的需求.能量和信息共用某一频段同时收发,会对信道产

生影响,需要从理论上深入探讨,提出解决方案.

3) 远距离 MPT 系统 DC-DC 效率的提高.MPT 用于长距离无线能量传输是一项极具吸引力的技术,但是自由空间 MPT 实验中 DC-DC 效率还小于 10%.系统效率的提高可从两方面来考虑:第一,根据接收整流天线对功率密度的需求优化发射天线口径电平分布,研究发射天线功率合成和功率源技术<sup>[49]</sup>;第二,可以结合时间反演算法,利用接收到的脉冲信号定位接收端位置,自动优化微波输能的传输路径,将电磁波聚焦在接收端附近,提高能量传输系统的效率及灵活性.

#### 参考文献

##### References

- [ 1 ] Brown W C. Experiments in the transportation of energy by microwave beam [ J ]. IRE International Convention Record, 1964, 12(2) : 8-17
- [ 2 ] Brown W C. The technology and application of free-space power transmission by microwave beam [ J ]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(1) : 11-25
- [ 3 ] 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 Digest, 1976: 139-141
- [ 4 ] Dickinson R M. Wireless power transmission technology state of the art the first Bill Brown lecture [ J ]. Acta Astronautica, 2003, 53(4-10) : 561-570
- [ 5 ] Falkenstein E, Roberg M, Porpovic Z. Low-power wireless power delivery [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(7) : 2277-2286
- [ 6 ] 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) : 770-779
- [ 7 ] Mcspadden J O, Dickinson R M, Fan L, et al. A novel oscillating rectenna for wireless microwave power transmission [ J ]. Microwave Symposium Digest, 1998, 2: 1161-1164
- [ 8 ] Suh Y H, Chang K. A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45 and 5.8 GHz wireless power transmission [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(7) : 1784-1789
- [ 9 ] Ren Y J, Muhammad F F, Chang K. A compact dual-frequency rectifying antenna with high-orders harmonic-rejection [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(7) : 2110-2113
- [ 10 ] Takhedmit H, Cirio L, Saddi Z, et al. A novel dual-frequency rectifier based on a 180° hybrid junction for RF energy harvesting [ C ] // 7th European Conference on Antennas and Propagation, 2013: 2472-2475
- [ 11 ] 沈龙, 杨雪霞, 聂美娟, 等. 一种新型的双频整流电路 [ J ]. 微波学报, 2014, 30(5) : 63-66

- SHEN Long, YANG Xuexia, NIE Meijuan, et al. A novel rectifying circuit operating at dual-frequency [J]. *Journal of Microwaves*, 2014, 30(5): 63-66
- [12] Niotaki K, Kim S, Jeong S, et al. A compact dual-band rectenna using slot-loaded dual band folded dipole antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(1): 1634-1637
- [13] Sun H C, Guo Y X, He M, et al. A dual-band rectenna using broadband yagi antenna array for ambient RF power harvesting [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(1): 918-921
- [14] Pham B L, Pham A V. Triple bands antenna and high efficiency rectifier design for RF energy harvesting at 900, 1 900 and 2 400 MHz [C] // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2013: 1-3
- [15] Masotti D, Costanzo A, Del Prete M, et al. Genetic-based design of a tetra-band high-efficiency radio-frequency energy harvesting system [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2013, 7(15): 1254-1263
- [16] Kuhn V, Lahuéc C, Seguin F, et al. A multi-band sacked RF energy harvester with RF-to-DC efficiency up to 84% [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(5): 1768-1778
- [17] Oka T, Ogata T, Saito K, et al. Triple-band single-diode microwave rectifier using CRLH transmission line [C] // *Asia-Pacific Microwave Conference*, 2014: 1013-1015
- [18] Hagerty J A, Helmbrecht F B, Mccalpin W H, et al. Recycling ambient microwave energy with broad-band rectenna arrays [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(3): 1014-1024
- [19] Collado A, Georgiadis A. Conformal hybrid solar and electromagnetic (EM) energy harvesting rectenna [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, 60(8): 2225-2234
- [20] Suh Y H, Chang K. A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45 and 5.8 GHz wireless power transmission [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(7): 1784-1789
- [21] Niokati K, Georgiadis A, Collado A. Dual-band rectifier based on resistance compression networks [C] // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2014: 1-3
- [22] Marian V, Vollaie C, Verdier J, et al. Potentials of an adaptive rectenna circuit [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10(1): 1393-1396
- [23] Marian V, Allard B, Vollaie C, et al. Strategy for microwave energy harvesting from ambient field or a feeding source [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4481-4491
- [24] Yoshida S, Fukuda G, Noji T, et al. Wide power range operable 3-stage S-band microwave rectifier with automatic selector based on input power level [C] // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2013: 1-4
- [25] Scorcioni S, Bertacchini A, Larcher L, et al. RF to DC CMOS rectifier with high efficiency over a wide input power range for RFID applications [C] // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2012: 1-3
- [26] Scorcioni S, Bertacchini A, Larcher L. A 868 MHz CMOS RF-DC power converter with -17 dBm input power sensitivity and efficiency higher than 40% over 14 dB input power range [C] // *Proceedings of the ESSCIRC*, 2012: 109-112
- [27] Scorcioni S, Larcher L, Bertacchini A, et al. An integrated RF energy harvester for UHF wireless powering applications [C] // *IEEE Wireless Power Transfer*, 2013: 92-95
- [28] Scorcioni S, Larcher L, Bertacchini A. A reconfigurable differential CMOS RF energy scavenger with 60% peak efficiency and -21 dBm sensitivity [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2013, 23(3): 155-157
- [29] Li C J, Lee T C. 2.4 GHz high-efficiency adaptive power harvester [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2014, 22(2): 434-438
- [30] Sun H, Zhong Z, Guo Y X. An adaptive reconfigurable rectifier for wireless power transmission [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2013, 23(9): 492-494
- [31] 陆佳骏, 杨雪霞, 狄陆祺. 915 MHz 功率自适应平面印刷整流电路设计与实验 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2016, 22(4): 381-387
- LU Jiajun, YANG Xuexia, DI Luqi. Design and experiment of a 915 MHz printed rectifier with adaptive power [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2016, 22(4): 381-387
- [32] Lu J J, Yang X X, Tan C. A dual-frequency rectifier with adaptive power [C] // *Asia-Pacific Microwave Conference*, 2015, DOI: 10.1109/APMC.2015.7413023
- [33] Lu J J, Yang X X, Tan C. A four-band rectifier with adaptive power for electromagnetic energy harvesting [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(10): 819-821
- [34] Huang Y, Shinohara N, Mitani T. A study on low power rectenna using DC-DC converter to track maximum power point [C] // *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, 2013: 83-85
- [35] Huang Y, Shinohara N, Mitani T. A constant efficiency of rectifying circuit in an extremely wide load range [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(4): 986-993
- [36] Koert P, Cha J T. Millimeter wave technology for space power beaming [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1992, 40(6): 1251-1258
- [37] Yoo T W, Chang K. Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1992, 40(6): 1259-1266
- [38] 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
- [39] Yoo T W, Chang K. 35 GHz integrated circuit rectifying antenna with 33% efficiency [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(23): 2117
- [40] Yoo T W, Mcspadden J, Chang K. 35 GHz rectenna implemented with a patch and a microstrip dipole antenna [C] // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1992, 1: 345-348

- [41] Ren Y J, Li M Y, Chang K. 35 GHz rectifying antenna for wireless power transmission [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(11):602-603
- [42] Chiou H K, Chen I S. High-efficiency dual-band on-chip rectenna for 35 and 94 GHz wireless power transmission in 0.13  $\mu\text{m}$  CMOS technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(12):3598-3606
- [43] Ladan S, Wu K. Nonlinear modeling and harmonic recycling of millimeter-wave rectifier circuit [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(3):937-944
- [44] 何繁繁, 洪伟, 吴柯, 等. 基于基片集成波导的正反渐变槽整流天线阵列的研究 [J]. *中国科技论文在线*, 2008, 3(1):59-64  
HE Fanfan, HONG Wei, WU Ke, et al. Substrate integrated waveguide rectenna array using antipodal linearly tapered slot antenna [J]. *Sciencepaper Online*, 2008, 3(1):59-64
- [45] 谭冠南, 杨雪霞. 高效平面印刷毫米波段整流电路设计与实验 [J]. *电波科学学报*, 2015, 30(6):1131-1136  
TAN Guannan, YANG Xuexia. Design and experiment of a planar printed rectifying circuit operated in millimeter wave [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(6):1131-1136
- [46] Mei H, Yang X X, Han B, et al. High-efficiency microstrip rectenna for microwave power transmission at Ka band with low cost [J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2016, 10(15):1648-1655
- [47] Tan G N, Yang X X, Mei H, et al. Study on millimeter-wave vivaldi rectenna and arrays with high conversion efficiency [J/OL]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, [2016-11-23]. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1897283>
- [48] Xu J S, Xu C L, Xu D M, et al. Diode large-signal characteristics measurement for high-power rectennas [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 45(3):249-251
- [49] 杨雪霞, 周华伟, 周永金, 等. 微波无线输能技术研究进展与系统设计 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2014, 20(5):541-549  
YANG Xuexia, ZHOU Huawei, ZHOU Yongjin, et al. Research progress in microwave wireless power transmission technologies and system efficiency evaluation [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2014, 20(5):541-549

## Research development of rectennas and outline of design methods

YANG Xuexia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072

**Abstract** MPT (Microwave Power Transmission) technology transfers power wirelessly from point to point by microwave beam, which could be applied in the solar power satellites, airships in the near space, and wireless sensors, etc. The rectenna, receiving the microwave power and converting it into the direct current power, is the key device of an MPT system. Firstly, the latest research development of rectennas is overviewed in terms of expanding the operation frequency bands, the input power and the resistive load ranges. Secondly, the effective design methods of rectennas are outlined after analyzing the topological structures of the rectifying circuits and their corresponding application conditions, which are the core component of rectennas. Finally, the problems about rectennas to be solved in the future are analyzed and the research directions of MPT technology are proposed.

**Key words** rectennas; rectifying circuits; rectifying efficiency; antennas; microwave power transmission