



# 宽功率微波整流电路研究进展

## 摘要

无线能量传输可以摆脱线缆的限制,实现传感器的远距离无线充电、无电池设备的低功率能量收集等.首先介绍了无线能量传输的研究意义和工作原理,接着引出了其接收端的整流电路效率易受到输入功率波动影响的问题,并简要介绍了目前的一些解决方案;在此基础上介绍了3种采用无源网络减小对输入功率敏感的整流电路结构,这些结构能使电路在更宽的功率范围内实现高效率整流;最后展望了微波整流电路未来的一些研究方向.

## 关键词

无线能量传输;整流电路;高效率;宽功率范围

中图分类号 TM461;TN622

文献标志码 A

收稿日期 2016-11-21

资助项目 国家自然科学基金(61671210);广东省自然科学基金(2015A030310249)

## 作者简介

杜志侠,男,博士生,主要研究方向为微波电路、无线能量传输.

章秀银(通信作者),男,博士,教授,2014年国家优秀青年科学基金获得者,教育部长江青年学者,中组部万人计划青年拔尖人才,主要研究方向为微波电路与天线、LTCC、无线能量传输. zhangxiuyin@hotmail.com

## 0 引言

一般所说的无线能量传输指的是工作在射频的定向能量传输,工作频率远低于红外线和光学频率.因为无线能量传输若采用红外线或者光学频率,在起雾或者下雨等恶劣天气下会遇到很多挑战<sup>[1]</sup>.无线能量传输的思想自从电力被发现以来就已经存在.在19世纪后期,特斯拉描述了在两点之间自由地传输能量而不需要物理连接对人类无与伦比的重要性<sup>[2]</sup>.它打破了传统的通过电缆传播电能的方式,把能量转化为电磁波的形式从发射端发射出来,在空间中将其传播到接收端,开辟了一种新的能量传播方式.一方面,无线能量传输可用于空间太阳能发电(SSP)或太阳能卫星(SPS),虽然仍在实验阶段,太阳能卫星的研究人员在超远距离和高功率的能量转换方面取得了进步,从而可以通过无线电波共享电能,即在地球周围的轨道站收集太阳能并通过无线能量传输将电能辐射到地面卫星接收站<sup>[3-5]</sup>.另一方面,无线能量传输可用于非接触式射频识别、电动车辆和移动设备等的无线充电.此外,由于采用远程供电的无线设备能移除大电池,使设备体积更小,这种尺寸和质量的减小有利于增加一些概念设计的可行性,例如极薄的、柔性的显示器<sup>[6]</sup>,基于隐形眼镜的增强现实(AR)技术<sup>[7]</sup>和智能微尘<sup>[8]</sup>等.

采用微波作为能量传输媒介的无线能量传输,也称为微波输能,主要用于远距离的能量传输和能量收集.微波输能的工作原理如图1所示,射频发生器产生的射频能量通过发射天线辐射出去,在自由空间中传播,继而被整流天线接收并转换为直流能量,经过升降压电路输出给用户使用<sup>[9]</sup>.其中整流天线由接收天线和整流电路构成,整流电路包括阻抗匹配网络/带通滤波器、整流结构和低通滤波器.带通滤波器用于实现天线与整流结构的阻抗匹配,以及防止整流元件产生的谐波辐射到环境中;整流结构一般可由二极管构成,将交流转换为直流;输出端口的低通滤波器用于抑制交流,输出直流.整流电路的转换效率对微波输能系统的效率具有关键性影响,因此研究人员提出了很多电路结构和方法以提高整流效率,比如谐波回收技术<sup>[10]</sup>、反对称双二极管结构<sup>[11-12]</sup>、谐波抑制二极管结构<sup>[13-14]</sup>等.

在微波输能系统中,接收端的整流天线接收到的功率并不是恒定不变的,而是会受到传输路径上的损耗、多径反射等的影响,接收到的电磁波会发生变化.当整流电路的输入功率发生变化时,由

1 华南理工大学 电子与信息学院,广州,510641

2 广州大学 物理与电子工程学院,广州,510006

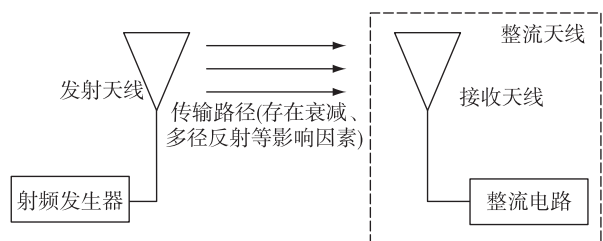


图1 微波输能系统示意

Fig. 1 Block diagram of a microwave power transfer system

于整流装置的非线性,其输入阻抗会发生很大的变化,引起阻抗失配并降低整流效率.传统的整流电路都是优化设计在特定的输入功率下,功率变化时整流效率易受影响.

为了解决上述问题,国内外的学者们提出了几种不同的方法,其中最直接的方法是采用功率控制系统,切换电路的工作状态.在该类电路中,首先设计串联、并联和桥式3种结构的整流支路,在3个不同的功率范围分别实现高整流效率;然后通过功率检测电路连接这3个整流电路,在输入功率变化时候可以切换开关选择这3种整流状态,从而在较宽输入功率范围内实现高整流效率<sup>[15-16]</sup>.类似的,基于场效应管控制的自适应整流电路采用功率控制系统连接2个分支整流电路,通过在2个电路的串联和并联2种连接状态间切换,拓宽电路的工作功率范围<sup>[17]</sup>.此外,最大功率点跟踪技术(Maximum Power Point Tracking, MPPT)也可以被应用于微波能量收集中<sup>[18]</sup>.MPPT是以功率控制系统的形式工作于整流电路和用户负载之间的.由于在不同输入功率下,整流电路达到最大整流效率的对应负载是不同的,可通过实时检测输入到整流电路的输入功率的变化,改变整流电路的负载,从而实现在宽输入功率范围内的高效率整流.这样的在线追踪方法比较精确,但是输入功率的变化不能过快,否则会影响芯片的数据采集从而影响精度.

前面介绍的是通过功率控制电路的方法调整整流电路的工作模式,虽然都实现了功率范围的扩展,但是最大的整流效率都比较低.这是因为电路的实现需要一定数量的场效应管或者控制电路,器件本身造成的损耗较大;同时控制电路和检测电路的工作都需要消耗额外的能量,从而为电路带来了不必要的损耗.因而,有很多研究采用无源网络的方法提高整流电路的工作功率范围,减小电路损耗.文献<sup>[19]</sup>提出了利用MOSFET管保护二极管的自适应

可重构整流电路的方法.当输入功率过大时,利用MOSFET管将二极管上的电压控制在击穿电压上,保持最高的整流效率,直到场效应管也被击穿.但是由于场效应管功率耗散在高频率上的增大,最高效率只能达到60%.美国Abdelhalem等<sup>[20]</sup>通过变容二极管设计出E类整流电路的动态阻抗匹配网络,提高不同功率下的电路匹配性能,进而提高整流效率.美国麻省理工学院的Han等<sup>[21]</sup>提出了实阻抗压缩的方法,通过一个无源网络对输入阻抗进行调控,减小输入阻抗变化范围,从而提高电路的匹配性能.该方法被应用到了整流电路的设计中<sup>[22-24]</sup>,减小了整流电路随功率变化的输入阻抗变化范围,提高了匹配性能,在宽功率范围内实现了高整流效率.然而,在加入实阻抗压缩网络(Resistance Compression Network, RCN)之前,需要先将整流电路随输入功率变化的输入阻抗调成实阻抗,因此在应用上有一定的限制.本文将介绍几种拓宽整流电路输入功率范围的方法,为研究者们拓展该研究的思路.

## 1 基于不等分功率分配的并行双路整流电路

由于采用有源控制系统切换并联支路而改变工作状态的方法不仅需要额外的能量支持,而且电路设计也较为复杂,因此设计一种由无源器件连接并联支路的新型整流电路具有重要意义.本节介绍一种基于不等分功率分配的并行双路整流电路,拓展电路工作的功率范围<sup>[25]</sup>.

### 1.1 整流电路结构

基于不等分功率分配的并行双路整流电路的结构框图如图2所示,该电路由1个不等分功分器和2个在不同的输入功率点上实现最大效率的整流支路连接构成.其中一个整流支路工作在较低的功率范围,而另一个工作在较高的功率范围.通过该方法,可以在较宽的输入功率范围内实现高整流效率.

在本设计中,整流支路采用传统的串联二极管结构,其电路结构如图3所示.该结构由匹配网络、整流二极管和直流滤波器构成.匹配网络包括隔直通交的电容 $C_1$ 和用于阻抗匹配的微带线,将功率最大化地传输到整流二极管上.整流二极管用于将交流转换成直流.为了实现高效率,需要选择具有低导通电压和高速开关特性的二极管.本设计采用肖特基二极管HSMS2860,其相关参数为 $V_F = 0.3\text{ V}$ , $R_S = 6\ \Omega$ , $C_{j0} = 0.18\text{ pF}$ 和 $V_B = 7\text{ V}$ .直流滤波器包括电容 $C_2$ 和3个开路枝节线,用于抑制基波和由二极管的

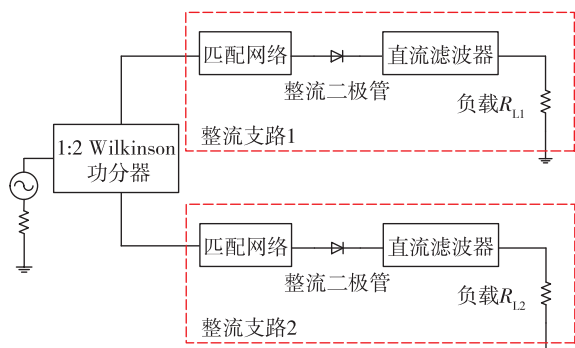


图2 提出的双路整流器的结构框图

Fig. 2 Block diagram of the proposed two-way rectifier

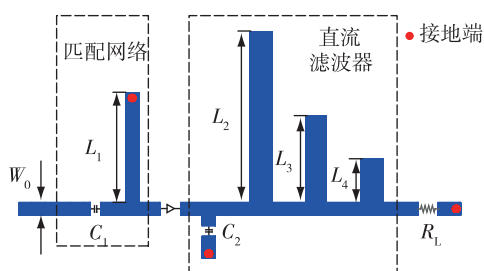


图3 整流支路的结构

Fig. 3 Layout of the sub-rectifier

非线性产生的谐波.整流支路可以通过调节负载和匹配网络,在不同的功率范围上实现高整流效率.

本节设计的并行双路整流电路工作在 915 MHz,采用的板材为 Arlon AD255,介电常数为 2.55,损耗角正切为 0.001 8,厚度为 30 mil.整流支路 1 工作在较低的输入功率(10 mW),对应的电路参数为:  $C_1 = 1 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 100 \text{ pF}$ ,  $L_1 = 37.4 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 56.1 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 28.4 \text{ mm}$ ,  $L_4 = 14.4 \text{ mm}$ ,  $R = 1 \text{ 000 } \Omega$ ;整流支路 2 工作在较高的输入功率(30 mW),对应的电路参数为:  $C_1 = 1.5 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 100 \text{ pF}$ ,  $L_1 = 36.8 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 56.1 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 28.2 \text{ mm}$ ,  $L_4 = 14.4 \text{ mm}$ ,  $R = 300 \Omega$ .该电路通过一个 1:2 的 Wilkinson 功分器实现不等功率分配.其中功分器的低功率输出一端连接整流支路 1,高功率输出一端连接整流支路 2.

### 1.2 电路性能与比较

结合以上描述,可以设计出基于不等功率分配的并行双路整流电路,其效率计算公式如下:

$$E_{PC} = \frac{P_{out1} + P_{out2}}{P_{in}}, \quad (1)$$

其中  $P_{out1}$  和  $P_{out2}$  为输出功率,  $P_{in}$  为输入功率.

图 4 所示为提出的并行双路整流电路与 2 个整

流支路的仿真性能比较.提出的整流电路在 4~60 mW 的输入功率范围内整流效率高 于 60%,而 2 个整流支路分别只在 1~16 mW 和 3.5~46 mW 范围内达到该效率.此外,跟整流支路 2 相比,提出的电路在 4~31 mW 的输入功率范围内效率与整流支路 2 相似,然而在 32~60 mW 范围内具有更高的效率.

图 5 所示为提出的整流电路的加工测量结果与仿真结果的比较.整流电路输出的直流电压通过万用表测量.由图 5 可见,测量结果与仿真相仿.电路在输入功率为 31 mW 时效率达到最大值 77.4%,而另一个效率峰值点在输入功率为 46 mW 处(72%).整流效率在 3.5~58 mW 的输入功率范围内效率高于 60%,在 8~47 mW 的功率范围内高于 70%.

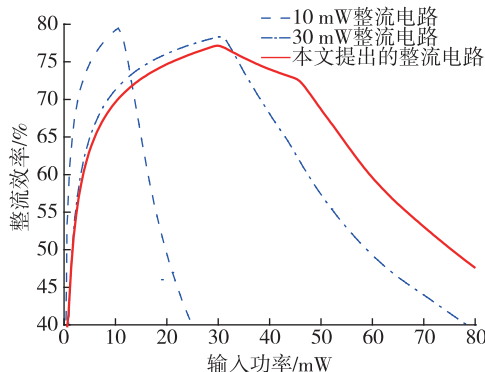


图4 双路整流器与 2 个整流支路的性能比较

Fig. 4 Comparison between the proposed two-way rectifier and two sub-rectifiers

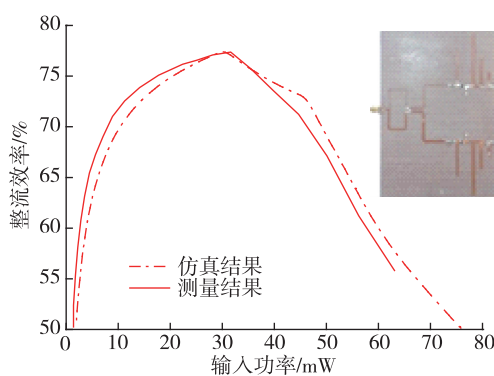


图5 双路整流器的仿真和测量效率

Fig. 5 Simulated and measured efficiency of the proposed rectifier

## 2 基于实阻抗压缩网络的差分整流电路

除了采用切换工作支路和调整功率分配等方法外,如果可以通过在输入端口加入一个无源网络,减小输入阻抗在输入功率变化时的阻抗变化范围,将

能有效地提高电路匹配性能, 在更宽的输入功率范围内实现高整流效率. 文献[26]提出了一种采用阶跃阻抗谐振器减小整流电路输入阻抗变化范围的方法, 然而谐振器的使用会引入损耗, 从而降低整流效率. 文献[22]采用实阻抗压缩网络使输入阻抗在一定的输入功率范围内保持稳定, 提高阻抗匹配性能, 在宽功率范围内实现高整流效率. 但是设计中采用了分立元件, 限制了阻抗压缩比. 在文献[23-24]中, 利用传输线设计实阻抗压缩网络, 提高了调控阻抗压缩比的设计自由度. 然而, 在上述基于实阻抗压缩的设计中, 2个整流支路通过阻抗压缩网络只连接到一个输入端口, 而不是连接到具有双端口的电路结构. 在低功率的工作环境中, 差分馈电天线是整流天线应用中一种具有高效率优势的技术方案<sup>[27-29]</sup>. 因此, 本节将设计一种差分实阻抗压缩网络, 并应用到差分整流电路的设计中以实现高效的宽功率传输<sup>[30]</sup>.

## 2.1 采用传输线的差分实阻抗压缩网络

图6所示为提出的基于差分实阻抗压缩网络的整流电路结构框图. 差分实阻抗压缩网络连接在输入端口和一个传统的差分整流电路之间, 用于减小输入功率变化时整流电路输入阻抗的变化范围, 其结构示意图如图7所示. 结构中电阻负载 $R$ 表示整流支路的输入电阻, 短路和开路枝节线具有相同的特性阻抗 $Z_0$ , 电长度分别为 $\theta$ 和 $90^\circ-\theta$ . 差分实阻抗压缩网络的设计如下.

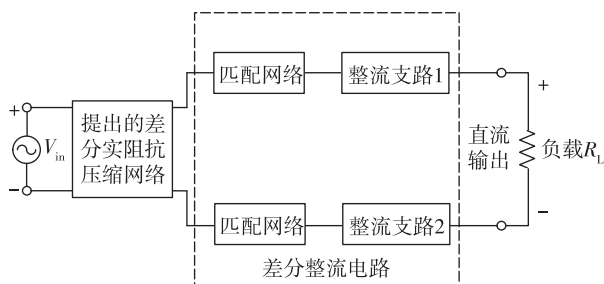


图6 基于实阻抗压缩网络的差分整流电路的结构

Fig. 6 Block diagram of the proposed differential rectifier with RCN

根据传输线理论, 开路和短路枝节线的阻抗分别为  $Z_{open} = -jZ_0 \tan \theta$  和  $Z_{short} = jZ_0 \tan \theta$ , 因此该网络的输入阻抗为  $Z_{in} = Z_{open}/R + Z_{short}/R$ , 计算可得输入电阻:

$$R_{in} = \frac{2R}{1 + \left(\frac{R}{Z_0 \tan \theta}\right)^2}. \quad (2)$$

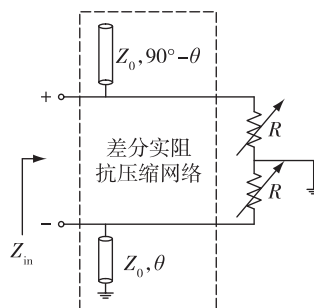


图7 差分实阻抗压缩网络

Fig. 7 The schematic of the proposed differential RCN

为了进一步研究负载电阻 $R$ 与输入电阻 $R_{in}$ 的关系, 根据式(2)可求得

$$r_{in} = \frac{2r}{1 + r^2}, \quad (3)$$

其中 $r_{in}$ 和 $r$ 分别为 $R_{in}/(Z_0 \tan \theta)$ 和 $R/(Z_0 \tan \theta)$ .  $r_{in}$ 随着 $r$ 变化的曲线如图8所示.

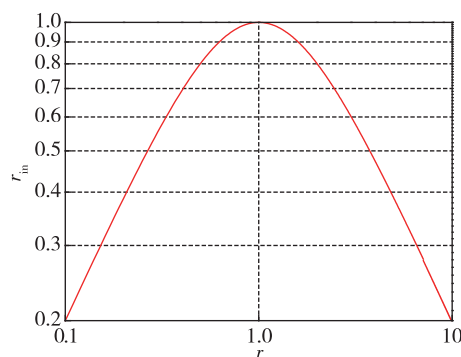


图8 归一化的输入电阻随着负载电阻变化的曲线

Fig. 8 Normalized input resistance varied with normalized load resistance

当 $R \in [R_{min}, R_{max}]$ 时,  $R_{max}$ 与 $R_{min}$ 的比值可定义为

$$C = \frac{R_{max}}{R_{min}} = \frac{r_{max}}{r_{min}}. \quad (4)$$

输入电阻 $R_{in}$ 的最大值 $R_{in,max}$ 和最小值 $R_{in,min}$ 的比值可定义为

$$C_{RCN} = \frac{R_{in,max}}{R_{in,min}} = \frac{r_{in,max}}{r_{in,min}}. \quad (5)$$

当负载电阻 $R$ 的变化范围确定时( $C$ 确定),  $C_{RCN}$ 越小, 输入电阻变化范围越小. 为了得到最小的 $C_{RCN}$ , 根据分析可知,  $Z_0$ 和 $\theta$ 需满足以下条件:

$$Z_0 \tan \theta = \sqrt{R_{min} R_{max}}, \quad (6)$$

此时可以得到最小的 $C_{RCN}$ :

$$C_{RCN,min} = \frac{1+C}{2\sqrt{C}} \quad (7)$$

从式(7)中可以看出,  $C_{RCN} < C$ , 输入电阻  $R_{in}$  的变化范围小于负载电阻  $R$ , 该差分网络实现了实阻抗压缩.

### 2.2 差分整流电路设计

图9所示为提出的基于实阻抗压缩网络的差分整流电路的示意,其中巴伦用于提供差分信号(方便测量).传统的差分整流电路结构如图10所示,2个整流支路包括匹配网络、隔直通交电容  $C_1$  (1 000 pF)、倍压整流结构(肖特基二极管 HSMS2822)、电容  $C_2$  (100 pF) 和谐波抑制网络,终端的直流负载为 2 000  $\Omega$  的电阻.

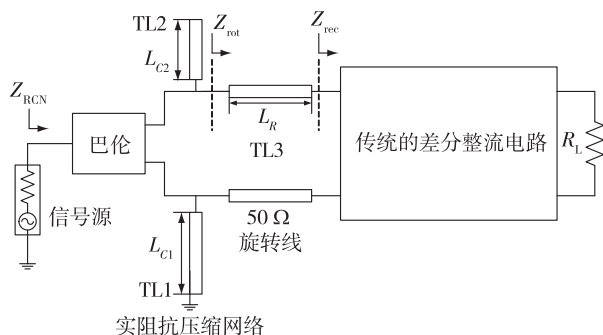


图9 基于实阻抗压缩网络的差分整流电路示意

Fig.9 Schematic of the proposed differential rectifier with RCN

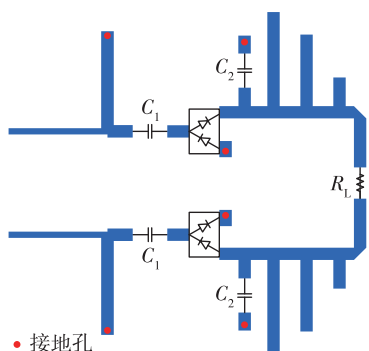


图10 传统的差分整流电路结构

Fig.10 Layout of the typical differential rectifier

传统的差分整流电路的输入阻抗  $Z_{diode}$  如图11中的黑色点画线所示.由于实阻抗压缩网络只能压缩电阻值,因此需要先通过 50  $\Omega$  传输线 TL3 将一定功率范围内的阻抗值转换成电阻值  $Z_{rot}$ .经过 TL3 的转换后,在 0~30 dBm 的输入功率范围内,  $Z_{rot}$  的变化范围为 50~250  $\Omega$ , 如蓝色虚线所示.根据上一节的分析,当满足式(6)时,可以实现最大压缩比.我们选

择微带线的特性阻抗  $Z_0$  为 50  $\Omega$ , 则可算出短路枝节线 TL1 的电长度  $\theta$  为 65.9°, 开路枝节线 TL2 的电长度为 24.1°.经过压缩,输入电阻的变化范围为 42.7~58.5  $\Omega$ , 如红色实线所示,实现了阻抗压缩.

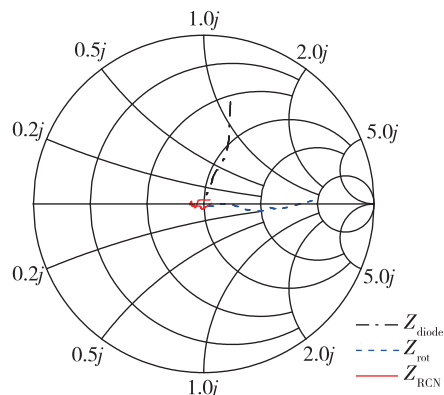


图11 提出的差分整流电路的输入阻抗(0~30 dBm)

Fig.11 Input impedance of the proposed differential rectifier (0 to 30 dBm)

### 2.3 电路性能与比较

基于实阻抗压缩网络的差分整流电路与传统的差分整流电路的测量和仿真结果如图12所示.从图12a可以看出,提出的电路在 5.5~33.1 dBm 的输入功率范围内效率高于 50%, 与传统的差分整流电路 (8.8~32.8 dBm) 相比,具有更宽的输入功率范围 (3.6 dB), 且提出的整流电路在 13.1~31 dBm 的输入功率范围内,整流效率高于 70%.另外,在输入功率较低时(如-5~15 dBm),提出的整流电路的效率高于传统的差分整流电路.

此外,整流电路需要被连接到不同的负载,比如直流变换器或稳压器.这种负载的变化同样会引起阻抗失配,从而降低电路效率.从图12b可以看出,在不同的负载下,提出的整流电路的效率仍然高于传统的差分整流电路.因此,基于实阻抗压缩网络的差分整流电路有利于减小整流效率对输入功率和输出负载变化的敏感性.

## 3 具有宽功率、频率和负载工作范围的高效整流电路

上一节介绍了一种基于实阻抗压缩网络的宽功率整流电路,具有较宽的工作功率范围,然而当频率变化时,效率仍然下降得较快.本节将介绍一种基于分支线耦合器的整流电路结构,不仅能拓宽整流电路的功率和负载工作范围,还能增加频率带宽<sup>[31]</sup>.

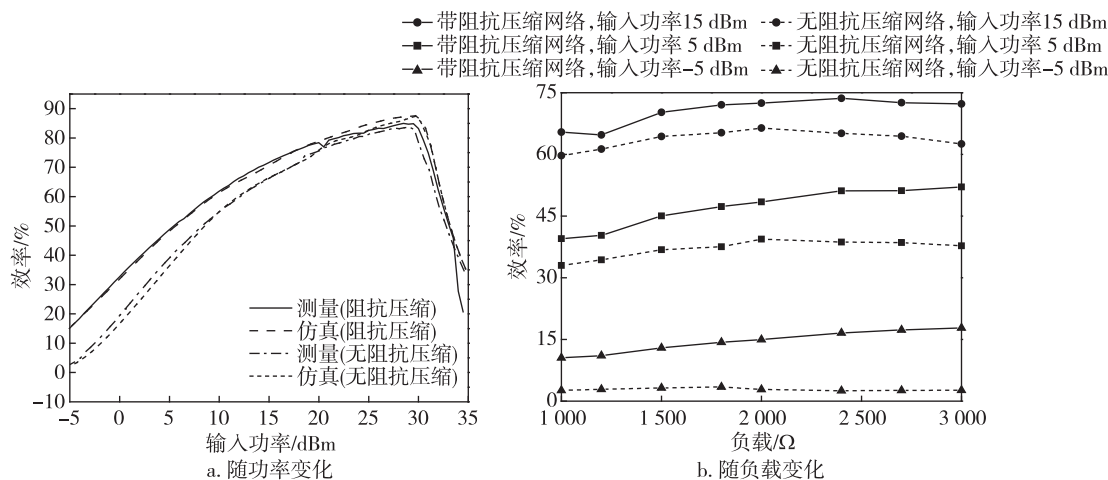


图 12 基于实阻抗压缩网络的差分整流电路与传统的差分整流电路的测量和仿真结果比较

Fig. 12 Efficiency comparison of the rectifier with and without RCN varied with input power(a) or output load(b)

### 3.1 基于分支线耦合器的整流电路结构分析

图 13 是基于分支线耦合器的整流电路结构框图.该结构由 1 个隔离端接地的分支线耦合器和 2 个子整流电路构成.当输入功率、频率和负载发生变化时,2 个整流支路的输入阻抗  $Z_{in1}$  和  $Z_{in2}$  发生变化,导致阻抗失配.通过图 13 介绍的结构,可以提高匹配性能,减小阻抗失配造成的能量损耗.

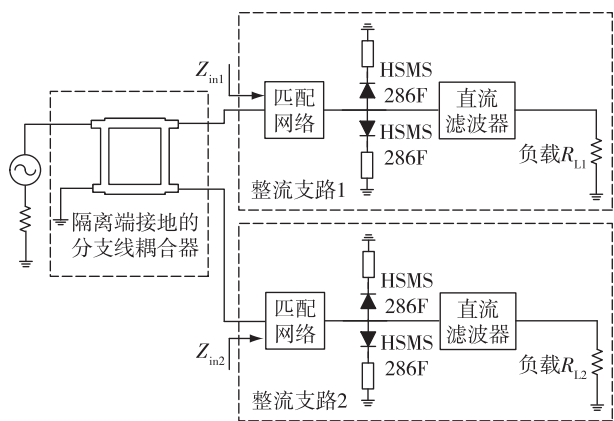


图 13 基于分支线耦合器的整流电路结构框图

Fig. 13 Block diagram of the proposed rectifier based on branch-line coupler

为了分析图 13 中的整流电路结构的工作原理,该结构被简化如图 14 所示,其中 2 个整流支路分别由阻抗  $Z_{L1}$  和  $Z_{L2}$  代替.在原理分析中,暂且忽略耦合器自身的损耗.首先,入射波  $a_1$  从 1 端口进入电路,并传输到 2,3 端口(图 14a).当输入功率发生变化导致  $Z_L$  变化时,阻抗失配并产生反射波  $a_2$  和  $a_3$ .反射波进入分支线耦合器并传输到 1,4 端口(图 14b).结

合分支线耦合器的特性<sup>[32]</sup>,可以求得:

$$b_1 = -\frac{a_3}{\sqrt{2}} - \frac{a_2}{\sqrt{2}}j = 0,$$

$$b_4 = -\frac{a_2}{\sqrt{2}} - \frac{a_3}{\sqrt{2}}j = \Gamma a_1j, \quad (8)$$

其中  $\Gamma$  是整流支路的反射系数,与输入功率相关.根据公式可以看出端口 1 保持匹配,反射波传输到端口 4.为了将反射波  $b_4$  重新利用,端口 4 被短路从而将  $b_4$  全反射回耦合器中,此时  $a_4 = -b_4$ .重新进入耦合器的  $a_4$  被传输到端口 2,3(图 14c).同样地,部分能量会被再次反射回 1,4 端口(图 14d),对应的反射系数为  $\Gamma'$ .结合耦合器特性计算可得:

$$b_1' = \Gamma \Gamma' a_1,$$

$$b_4' = 0, \quad (9)$$

从式(9)可知此时能量全部传输到 1 端口.由于 1 端口是匹配的,反射波  $b_1$  不能再被重新注入耦合器中.结合上述公式,可以求得提出的整流电路结构的反射功率损耗为

$$P_{\text{loss}_C} = \frac{1}{2}(|b_1|^2 + |b_1'|^2) =$$

$$\frac{1}{2}|\Gamma|^2|\Gamma'|^2|a_1|^2. \quad (10)$$

将图 1 中的分支线耦合器用一个理想的对称 T 型结代替连接 2 个子整流电路,用以比较提出的整流电路的性能.根据分析,可以得到其反射功率损耗为  $P_{\text{loss}_T} = |\Gamma|^2|a_1|^2/2$ .由于  $|\Gamma'| \leq 1$ ,可以得到:

$$P_{\text{loss}_C} = \frac{1}{2}|\Gamma|^2|\Gamma'|^2|a_1|^2 \leq$$

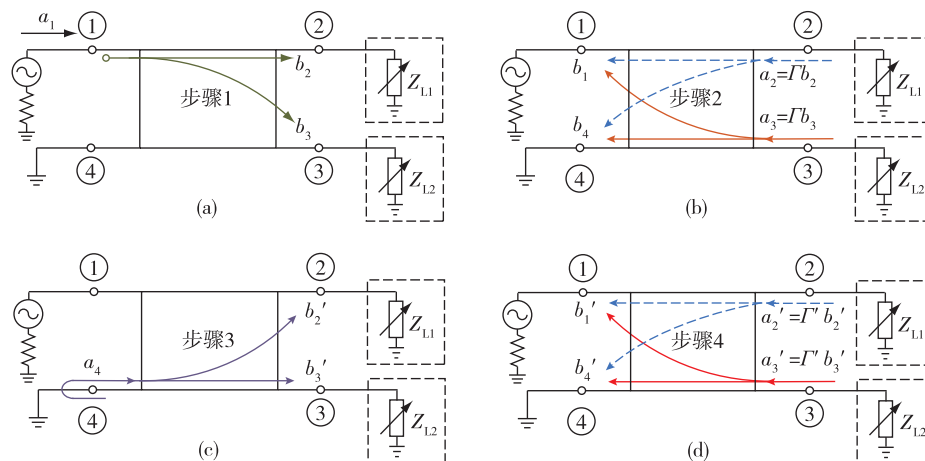


图 14 隔离端接地的分支线耦合器的示意图

Fig. 14 Schematic of the branch-line coupler with grounded isolation port and output load variation

$$\frac{1}{2} |\Gamma|^2 |a_1|^2 = P_{\text{loss}_T} \quad (11)$$

因此,提出的整流电路结构有利于减小由于阻抗失配产生的功率损耗.采用该结构,部分反射功率能被重新传输到整流支路中,进而提高整流效率.值得注意的是,频率变化时,耦合器的幅值和相位特性也会发生变化,限制效率的提升,因此耦合器的频带越宽,提出的整流电路便能够在越宽的频率范围内保持高整流效率.与一阶的分支线耦合器相比,二阶的耦合器具有更宽的频带,更加有利于宽带设计.此外,由于一阶和二阶的耦合器在工作频带内具有相同的幅值和相位特性,因此上述分析同样适用于采用二阶耦合器的整流电路结构.

### 3.2 整流电路性能比较

为了验证上述的理论分析,本节设计工作在 2.45 GHz 的单路整流器作为提出的电路的整流支路.2 个整流支路完全相同,均由匹配网络、整流二极管和直流滤波器构成.匹配网络用于将特定工作条件下的阻抗匹配到 50 Ω,而直流滤波器用于实现谐波抑制.2 个整流支路连接到二阶的分支线耦合器的输出端口,构成提出的整流电路结构.电路采用 HSMS286F 二极管,电容为 330 pF,负载为 360 Ω,并且设计在 Arlon-AD255 介质板上,其厚度为 0.762 mm,介电常数 2.55,损耗角正切 0.001 8.

图 15a 为电路加工图.图 15b—d 所示为基于分支线耦合器的整流电路与由 T 型结连接的普通整流电路随频率、功率和负载变化的测量结果.由图 15b 所示,基于分支线耦合器的整流电路在 2.08~2.58 GHz 频率范围内整流效率高于 70%,而普通整流电

路只在 2.12~2.49 GHz 范围内能高于该效率.由图 15c 所示,基于分支线耦合器的整流电路最高效率为 80.8%,在输入功率 10~18.6 dBm 的范围内效率高于 70%,在 2.9~20.2 dBm 的范围内效率高于 50%.与普通的整流电路相比,提出的整流电路能在更宽的输入功率范围内实现高效率.同样地,从图 15d 可以看出提出的整流电路能在更宽的负载范围内实现高整流效率.由于加工和二极管模型的精确度有限,测量与仿真结果存在一定的误差,但是在可接受的范围之内.

## 4 总结

微波输能作为无线能量传输的一种实现形式,其传输效率的提高主要取决于微波整流电路.目前关于微波整流电路的研究大多集中在提高电路在特定工作条件下的最大整流效率上,而在拓宽其工作功率、频率范围等方面的研究较少,有待进一步完善.一方面,由于传输路径的不确定性,接收到的信号强度并不稳定,因此设计宽功率工作范围的整流电路具有重要意义,本文正是在此基础上探讨了目前为止宽功率整流电路的研究进展,并着重介绍了 3 种新型的整流电路.另一方面,现如今微波能量收集也是一个热门的研究方向,因此宽频整流天线的研究同样具有重大意义.宽频整流天线有利于更多地收集周围环境中的各种频率信号,为负载端提供更多的能量,该类整流天线的设计是一个重要的研究方向.此外,整流电路与天线的融合设计也是一个重要的研究方向.目前的设计大多是将接收天线与整流电路分开设计,再连接起来.两者的融合设计有利

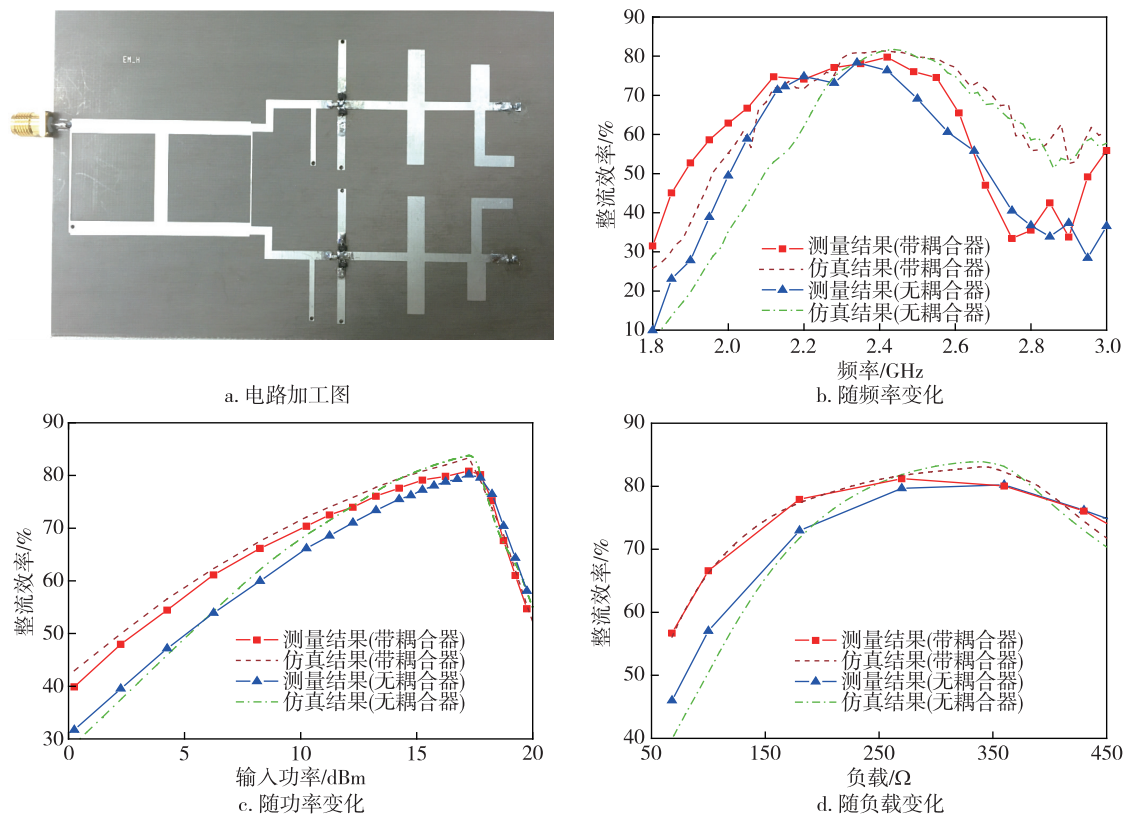


图 15 基于分支线耦合器的整流电路与由 T 型结连接的普通整流电路的测量和仿真结果比较

Fig. 15 The proposed rectifier layout(a), simulated and measured efficiencies of the rectifiers with and without coupler varied with frequency(b), input power(c), and output load(d)

于减小整流天线的体积和能量损耗。

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Wu K, Choudhury D, Matsumoto H. Wireless power transmission, technology, and applications [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101 ( 6 ) : 1271-1275
- [ 2 ] Tesla N. The transmission of electrical energy without wires as a means for furthering peace [ J ]. Electrical World & Engineer, 1905, 21-24
- [ 3 ] Glaser P E. Power from the sun: Its future [ J ]. Science, 1968, 162 ( 3856 ) : 857-861
- [ 4 ] Shinohara N. Wireless power transmission for solar power satellite ( SPS ) [ R ]. Space Solar Power Institute, 2000
- [ 5 ] Dickson R M. Power in the sky: Requirements for microwave wireless power beamers for powering high-altitude platforms [ J ]. IEEE Microwave Magazine, 2013, 14 ( 2 ) : 36-47
- [ 6 ] Crawford G. Flexible flat panel displays [ M ]. New York : John Wiley & Sons, Inc, 2005
- [ 7 ] Parviz B A. Augmented reality in a contact lens [ J ]. IEEE Spectrum, 2009, 46 ( 9 ) : 36-41
- [ 8 ] Warneke B, Last M, Liebowitz B, et al. Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer [ J ]. Computer, 2001, 34 ( 1 ) : 44-51
- [ 9 ] Mabrouki A, Latrach M, Ramanandraibe E. Low cost and efficient rectifier design for microwave energy harvesting [ C ] // Loughborough Antennas and Propagation Conference, 2013 : 289-292
- [ 10 ] 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
- [ 11 ] 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
- [ 12 ] Noda A, Shinoda H. Compact class-F RF-DC converter with antisymmetric dual-diode configuration [ C ] // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2012 : 1-3
- [ 13 ] Roberg M, Reveyard T, Ramos I, et al. High-efficiency harmonically terminated diode and transistor rectifiers [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60 ( 12 ) : 4043-4052
- [ 14 ] Guo J P, Zhang H X, Zhu X E. Theoretical analysis of RF-DC conversion efficiency for class-F rectifiers [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62 ( 4 ) : 977-985
- [ 15 ] Marian V, Voltaire C, Verdier J, et al. Potentials of an adaptive rectenna circuit [ J ]. IEEE Antennas and



- Wireless Propagation Letters,2011,10(1):1393-1396
- [16] Marian V, Allard B, Vollaire 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
- [17] Li C J, Lee T C. 2.4 GHz high-efficiency adaptive power harvester[J].IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems,2014,22(2):434-438
- [18] Dolgov A, Zane R, Popovic Z. Power management system for online low power rf energy harvesting optimization [J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2010, 57(7): 1802-1811
- [19] Liu Z T, Zhong Z, Guo Y X. Enhanced dual-band ambient RF energy harvesting with ultra-wide power range [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(9): 630-632
- [20] Abdelhalem S H, Gudem P S, Larson L E. An RF-DC converter with wide-dynamic-range input matching for power recovery applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2013, 60(6): 336-340
- [21] Han Y H, Leitermann O, Jackson D A, et al. Resistance compression networks for radio-frequency power conversion[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2007,22(1):41-53
- [22] Niotaki K, Georgiadis A, Collado A, et al. Dual-band resistance compression networks for improved rectifier performance [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(12): 3512-3521
- [23] Xu J F, Ricketts D S. An efficient, watt-level microwave rectifier using an impedance compression network (ICN) with applications in outphasing energy recovery systems [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(10): 542-544
- [24] Barton T W, Gordonson J, Perreault D J. Transmission line resistance compression networks and applications to wireless power transfer [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 252-260
- [25] Zhang X Y, Lin Q W. High-efficiency rectifier with extended input power range based on two parallel sub-rectifying circuits [C] // IEEE International Wireless Symposium, 2015: 1-4
- [26] Wang D F, Negra R. A 2.3 GHz single-ended energy recovery rectifier with stepped-impedance resonator for improved efficiency of outphasing amplifier [C] // IEEE European Microwave Conference, 2013: 920-923
- [27] Ushijima Y, Sakamoto T, Nishiyama E, et al. 5.8 GHz integrated differential rectenna unit using both-sided MIC technology with design flexibility [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(6): 3357-3360
- [28] 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
- [29] Sun H C. An enhanced rectenna using differentially-fed rectifier for wireless power transmission [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 32-35
- [30] Lin Q W, Zhang X Y. Differential rectifier using resistance compression network for improving efficiency over extended input power range [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(9): 2943-2954
- [31] Zhang X Y, Du Z X, Xue Q. High-efficiency broadband rectifier with wide ranges of input power and output load based on branch-line coupler [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems. I: Regular Papers, 2016: 1-9
- [32] Pozar D M. Microwave engineering [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005

## Research progress in microwave rectifier with wide operating power range

DU Zhixia<sup>1</sup> ZHANG Xiuyin<sup>1</sup> ZHENG Yanhua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641

<sup>2</sup> School of Physics & Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006

**Abstract** Wireless power transfer (WPT) is a promising technology and has potential applications where the wired power transmission is inconvenient or impossible, such as wireless charging of sensors and power harvest of battery-free devices. In this paper, the research significance and working principle of the WPT are introduced. Then a research subject is put forward that the efficiency of the rectifier in the receiving terminal of the WPT system is sensitive to the input power. Subsequently, researches carried out to cope with this issue are discussed. Among them, three novel efficient methods are detailed in this paper, which use passive network to extend the input power range for high rectifying efficiency. Finally, the future research orientation of the microwave rectifier is discussed.

**Key words** wireless power transfer (WPT); rectifier; high-efficiency; wide input power range