

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.11.008

# 射频能量收集的小型化双频整流天线设计

周晓萌, 郭松涛

(西南大学电子信息工程学院, 重庆 400715)

**摘要:**针对传统的双频整流天线转换效率不高的问题,提出了一种用于射频(RF, radio frequency)能量收集的双频整流天线。其工作频段为 1.75 GHz 和 2.45 GHz,主要由接收天线、阻抗匹配电路、二倍压整流电路和负载电路组成。基于小型化双频天线,引入一种新型双频阻抗匹配网络,以提高整流电路在较低输入功率下的射频-直流(RF-DC)转换效率。此外,采用新型阻抗匹配网络使得整流电路复杂度得以降低,减小了能量损耗。与传统的双频整流天线相比, -10 dBm 输入功率条件下,在普通室内环境中新型双频整流天线具有更高的 RF-DC 转换效率。实验结果显示,在 1.75 GHz GSM 频段和 2.45 GHz WLAN 频段上最大 RF-DC 转换效率分别可以达到 65.34% 和 54.3%。测试结果证明,其可以在物联网低功耗设备中得以应用。

**关键词:**射频能量收集;整流天线;双频天线;转换效率;物联网

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)11-066-10

## Design and implementation of compact dual-band rectenna for RF energy harvesting

ZHOU Xiaomeng, GUO Songtao

(College of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China)

**Abstract:** A dual-band rectenna for radio frequency (RF) energy harvesting was proposed in view of the problem of low conversion efficiency of traditional dual-band rectenna. The rectenna is mainly composed of receiving antenna, an impedance matching circuit, a double voltage rectifier and a load circuit. Based on the miniaturized dual-band antenna, a new dual-band impedance matching network was introduced to improve the RF-DC conversion efficiency of the rectifier at a lower input power. In addition, the new impedance matching network reduces the complexity of the rectifier. Compared with traditional dual-band rectenna, the novel dual-band rectenna has higher RF-DC conversion efficiency in indoor environment for an incident power of -10dBm. The experimental results show that the RF-DC conversion efficiency reach 65.34% and 54.3% in 1.75GHz GSM band and 2.45GHz WLAN band, respectively. And the rectenna can be used in Internet of Things (IoT) low power devices.

**Keywords:** RF energy harvesting; rectenna; dual-band antenna; conversion efficiency; IoT

随着物联网(IT, internet of things)技术的发展,诸如电子标签和传感器节点之类的小型设备已经在智

收稿日期:2018-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61772432, 61772433)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61772432, 61772433).

作者简介:周晓萌(1993—),男,硕士,主要从事无线传感器网络与天线方向研究,(E-mail)xmzhou720@163.com。

郭松涛(1975—),男,西南大学教授,博士生导师,主要从事无线与移动网络、无线传感器网络方向研究,(E-mail)stguo@swu.edu.cn。

能家居,工业监控,环境保护,智能交通等社会生活的各个方面逐渐得到普及和应用。但是由于电池寿命有限,能量问题成为制约这些小型设备大规模部署的瓶颈。近年来,从环境中进行射频能量收集的无线能量传输正在慢慢得到应用。

整流天线技术是射频能量收集的核心。采用整流天线技术将周围的射频能量转换为可用直流电能是获取射频能量的有效途径<sup>[3]</sup>。阻抗匹配网络用于匹配天线阻抗与整流电路的输入阻抗,通过使用阻抗匹配网络作为天线与整流电路之间的滤波器,可以实现能量转换效率的提高。虽然能量收集技术为无线能量传输开辟了新的途径,但是一个可靠的 RF 能量收集系统的实现仍然存在诸多挑战,主要体现在以下 3 个方面:

1) 环境中的能量分布比较分散,有些信号强度较弱,射频能量难以得到有效利用,需要找到合适且能量较为集中的频谱源。

2) 物联网设备的尺寸一般很小,因此需要解决能量收集系统的小型化问题。

3) 传统的整流天线转换效率不高,难以在实际中得到应用。因此,需要提高整流天线的 RF-DC 转换效率。

文献[4]提出了收集 Ka 波段电磁波进行微波能量传输的整流天线,但 Ka 波段能量源在平常生活环境中存在较少,难以在实际中得到大规模应用。为了收集到较多的环境能量,文献[5]将太阳能电池板与半透明天线集成为一个能量收集系统,但系统的结构复杂性和设备成本大大增加,这在一些小型化物联网应用中反而会造成不必要的累赘。文献[6]提出了 1 800 MHz 频段射频能量收集系统,作为延长电池寿命的有效方法,其输出电压和输出功率能够满足低功耗设备的工作需求。但是它忽略了生活环境中分布的另一个能量源,即无线上网 Wi-Fi 信号,并且该文达到最大 RF-DC 转换功率时的输入功率为 0 dBm,实际环境中难以收集到此功率水平的能量。以上提到的整流天线仅工作于单频段,事实上,当对多个频段射频能量进行利用时,收集到的能量会增加,即多频带整流天线可以收集到更多的能量。文献[7]提出了工作于双频段的整流天线,但由于上述文献中阻抗匹配网络的复杂性,会导致阻抗失匹配,造成额外的能量损耗,从而降低 RF-DC 转换效率。

笔者提出了一种用于射频能量收集的新型双频整流天线,由双频天线,双分支整流电路以及相应的阻抗匹配网络组成,工作于 1.75 GHz 的 GSM 频段和 2.45 GHz 的 WLAN 频段,在 -10 dBm 的输入功率下可以获得最佳 RF-DC 转换效率。为提高低功率输入水平条件下的射频能量收集性能,研究提出了一种新颖的阻抗匹配网络。首先,针对每个频段分别设计一个新型阻抗匹配网络,其次,将 2 个单频段匹配网络进行叠加,组成一个新的阻抗匹配网络。以双分支取代单分支作为整流电路架构,使整流电路可以获得更高的转换效率,适用于双频段工作,同时降低了多频匹配网络的复杂度。在设计阶段,采用天线与整流电路分离的设计方法,即利用 HFSS 与 ADS 仿真软件分别对天线和整流电路进行设计和优化,分析影响其性能的因素和变化规律,从而得到天线和整流电路的最佳参数。采用集总元件而不是微带线来设计整流电路,可以使得能量收集系统的尺寸大大减小。此外,所提出的天线结构简单易实现,便于大规模部署。

## 1 天线设计

天线作为射频能量收集系统的电磁波采集器,收集周围的射频能量并将能量传输到整流电路。因此,整流天线产生的电能取决于天线所收集的射频能量。由于不同的馈电方式对天线辐射性能有不同的影响,对微带馈电和同轴馈电这 2 种馈电方式进行对比:当采用微带线馈电时,微带线本身会产生辐射损耗,这种附加的损耗会对天线方向性参数产生不利影响,天线增益也会随之降低;采用同轴馈电时,馈源的模型可以表示为 Z-向电流圆柱和接地板上同轴开口处的小磁流环(一般情况下,磁流环的作用可以忽略),此时馈电点的位置可以在贴片内的任何位置进行选取,便于实现阻抗匹配,同时,接地板和同轴电缆在下方,可以有效避免同轴线对天线辐射的影响。

笔者选择 50  $\Omega$  同轴馈电作为天线馈电方式,设计了一款具有低剖面的小型化双频贴片天线作为接收天线,工作频段为 1.75 GHz 和 2.45 GHz。为了激发出 1.75 GHz 和 2.45 GHz 这 2 个频率,对馈电点的位置进行分析,在阻抗匹配方面,馈电点的位置位移对输入阻抗的影响很小,但是在辐射贴片的长度和宽度上偏离

中心位置时,会激发  $TM_{1n}$  和  $TM_{n1}$  模式,即此时天线工作于双频模式下,选择适当的位置,即可产生所需要的频段。

该天线结构如图 1 所示,图 2(a)和图 2(b)分别表示天线实物图的正面与背面。如图所示同轴线通过电介质基板连接到辐射贴片,基板材料为 Rogers RO4003,厚度为 1.524 mm,相对介电常数为 3.55,天线几何参数如表 1 所示。

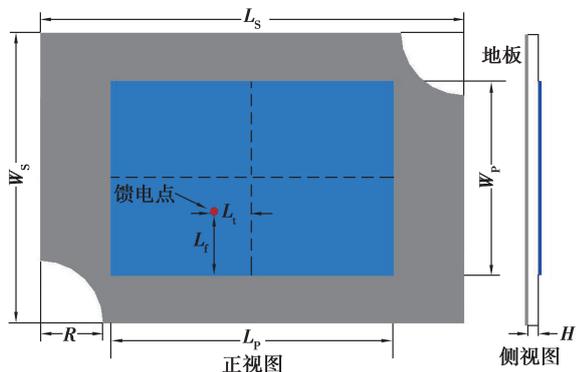


图 1 天线结构图

Fig.1 Configuration of proposed antenna

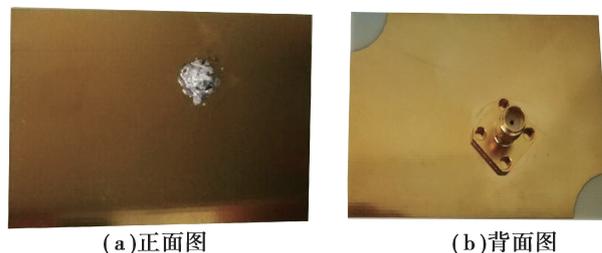


图 2 天线实物图

Fig.2 The fabri cated antenna

为改善天线的阻抗特性和辐射特性,在地板面上设计了 2 个弧形凹槽。图 3 所示为不同的弧形槽半径  $R$  对应的  $S_{11}$  曲线, $S_{11}$  表示天线的回波损耗。随着  $R$  的变化,可以清楚地看到当  $R=10$  mm 时对应的谐振点位置较好,此时达到最佳阻抗匹配。

表 1 优化后的天线参数

Table 1 Optimized parameters of antenna

参数	$L_s$	$W_s$	$W_p$	$L_p$	$L_f$	$L_t$	$H$	$R$
尺寸(mm)	67.2	46.3	30.9	44.8	9.9	6.1	1.524	10

图 4 所示为天线  $S_{11}$  参数测试结果与仿真结果对比,由图可见,测试结果与仿真结果较吻合,天线存在 2 个谐振点,中心频率分别为 1.75 GHz 和 2.45 GHz,在 1.73~1.77 GHz,2.42~2.49 GHz 这 2 个频段间的  $S_{11}$  均小于 -10 dB。如图 5 给出该天线在 1.75 GHz 和 2.45 GHz 工作频率下的辐射方向图。在 1.75 GHz 和 2.45 GHz 时,天线的增益分别为 3.94 dBi 和 6.3 dBi。

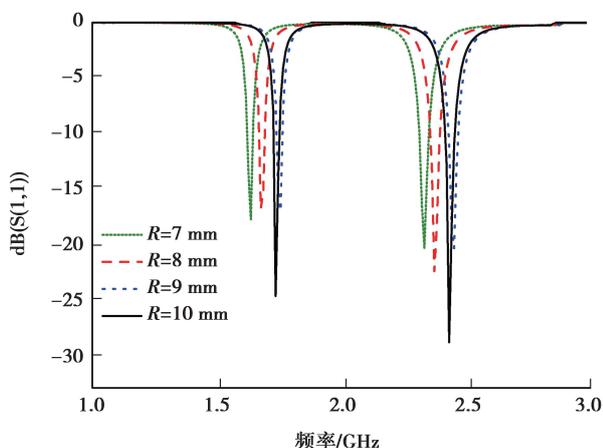


图 3 天线  $S_{11}$  曲线随  $R$  变化曲线

Fig.3 Simulated S-parameters of antenna with  $R$  changes

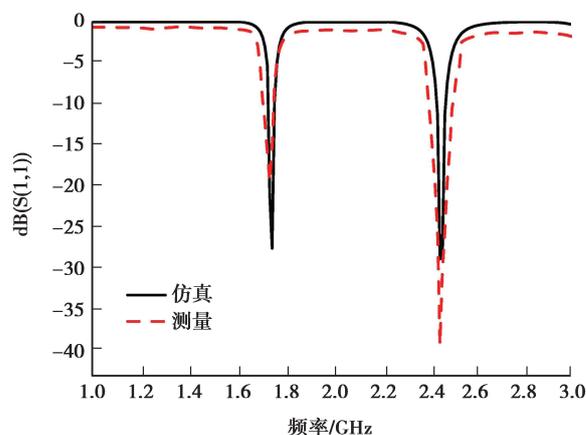


图 4 天线  $S_{11}$  参数的仿真及实测结果

Fig.4 Simulated and measured S-parameters of antenna

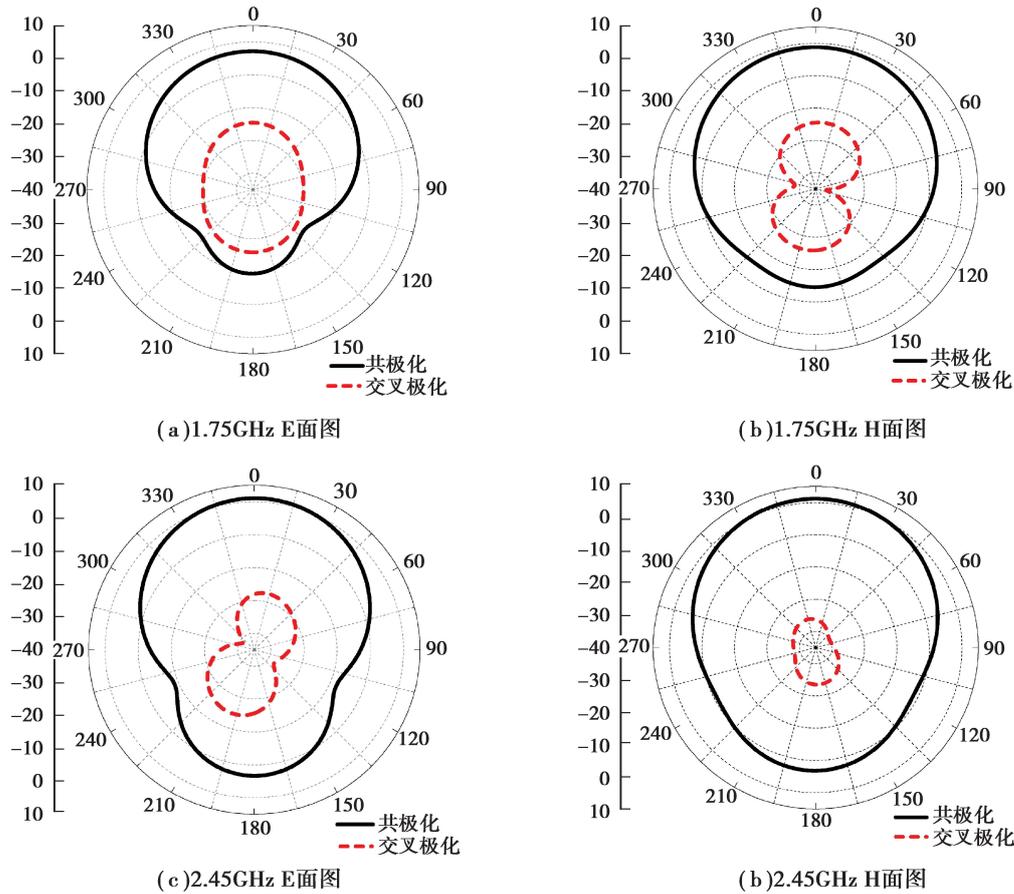


图 5 天线辐射方向图

Fig.5 Simulated radiation patterns at 1.75 GHz and 2.45 GHz

## 2 整流电路设计

首先对二倍压整流电路进行分析,然后介绍阻抗匹配网络,最后对所设计整流部分电路性能进行评估。

### 2.1 整流电路分析

整流电路用于将天线接收到的电磁波能量(RF, radio frequency)转换为直流电能(DC, direct current),是整个射频收集系统的关键。文献[11-13]研究表明整流电路的效率与输入功率和输出负载有密切关系。因此,整流电路设计的主要挑战在于如何在一定的功率和负载范围内获得最大的转换效率。选择 Avago HSMS-286C 肖特基整流二极管作为整流电路的核心元件,因为它与其他二极管相比具有较好的高频工作性能和较低的阈值电压。

如图 6 所示为一个二倍压整流电路拓扑。令一个正弦交流信号  $V_{in} = V_{ac} \sin \omega t$  输入到整流电路中,  $V_{ac}$  为交流输入幅度,  $\omega$  表示输入信号的频率。该交流信号的负半周期被并联二极管  $D_1$  整流,能量被收集进入电容  $C_1$ 。正半周期被串联二极管  $D_2$  整流,能量被收集进入电容  $C_2$ 。在下一个周期中,电容  $C_1$  中的能量传输到并联电容  $C_2$  中,然后对负载电阻  $R$  供电。基于以上分析,输出的电压可以用公示表示为

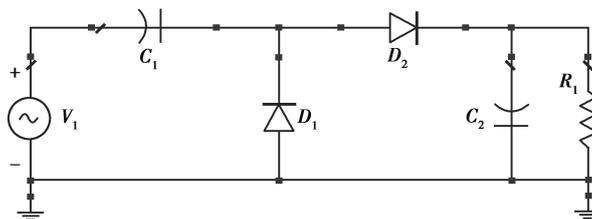


图 6 二倍压整流电路拓扑图

Fig.6 Topology of voltage double rectifier

$$V_{\text{out}} = 2V_{\text{ac}} \sin \omega t - 2V_{\text{B}}, \quad (1)$$

$V_{\text{B}}$  表示二极管的正向偏置电压。从公式(1)可以得出:整流电路的输出电压与输入功率,频率和二极管的性能有关。

## 2.2 阻抗匹配设计

阻抗匹配网络是一个无源网络,实现信号由接收天线端到负载的最大能量传输,并且达到最小的功率损耗,获得较好的 RF-DC 转换效率。阻抗匹配网络是提高转换效率的关键。由于天线阻抗是频率的函数,而整流电路输入阻抗是频率和入射功率的函数,双频带网络的能量损耗来自于 2 个方面:一是由于阻抗失配造成;另一种是匹配网络复杂度较高所造成。

文献[14-15]用来阐释在宽频带上进行阻抗匹配时能量损耗程度。采用如图 7(a)所示的电路结构。在文献[17]中,输入功率为 $-20$  dBm,频带宽度为 $1\ 700$  MHz,RF-DC 转换效率仅为 $8\%$ 。但在文献[16]中,同样的电路结构和同样的输入功率条件下,当频带宽度为 $300$  MHz 时,RF-DC 转换效率可达到 $15\%$ 。因此,从几个窄频带,而不是单个宽频带进行能量收集,可以提高 RF-DC 转换效率。

文献[16-18]阐释了匹配网络的复杂度大小造成的能量损耗程度,采用如图 7(b)所示的电路结构。由于阻抗匹配网络可以被视为带宽滤波器,因此该结构可以视为由一个低通滤波器和几个带通滤波器组成,集成在一条电路上。这将会导致系统复杂度的提升,并且当所处环境的频率发生变化时,系统的损耗将会很严重,如文献[16]中的 RF-DC 转换效率始终低于 $35\%$ 。

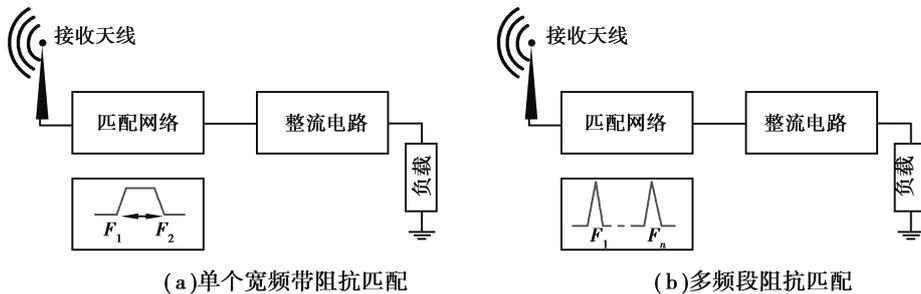


图 7 RF 能量收集系统框图

Fig.7 Block diagram of RF energy harvesting system

综合以上分析,可以设计一个新颖的双频整流电路,该电路将 2 条单频支路堆叠在一起<sup>[19]</sup>,组成一个双支带整流电路。因此,采用安捷伦公司的 ADS 软件的 Smith chart utility tool 设计阻抗匹配网络。在前面天线设计中,采用 $50\ \Omega$  作为端口激励,因此,阻抗匹配时,接收天线在选定的频率上被建模为一个 $50\ \Omega$  电阻模型。整流电路的阻抗在 $0$  dBm 输入功率时,初始设计为 $1.75$  GHz 时 $50\sim 9\ \text{j}\Omega$ , $2.45$  GHz 时 $40\sim 45\ \text{j}\Omega$ 。

接下来针对 $1.75$  GHz 和 $2.45$  GHz 设计 2 个单频率匹配网络。图 8(a)、(b)所示为 $1.75$  GHz 阻抗匹配网络电路图,网络拓扑结构是 T 型网络的变体,使用相同的方法来设计 $2.45$  GHz 的匹配分支的拓扑结构。图 9 所示为 2 个单分支电路的详细构成。可以看出,匹配网络由 2 个并联 LC 电路(即 $(C_1, L_2)$ 和 $(C_2, L_5)$ )和 4 个串联电感(即 $L_1, L_3, L_4, L_6$ )组成。这些参数 $L_1, C_1, L_2, L_3, L_4, C_2, L_5, L_6$  的值可以由 Smith chart utility tool 得到。阻抗匹配网络中的电容 $C_1$  和 $C_2$  用于在失配时补偿输入阻抗,通过同时控制这 2 个分量,可以完成阻抗的失配补偿。传统的双频段单支路匹配网络结构如图 10 所示。

如图 11 所示将这 2 个分支合并为一个电路作为阻抗匹配网络。采用 ADS 软件对整体电路进行仿真,采用电阻替代实际应用中的负载。通过仿真优化,得到所提出整流电路各元器件的最优值,即: $L_1 = 6.74$  nH, $L_2 = 4.03$  nH, $L_3 = 14.47$  nH, $L_4 = 4.96$  nH, $L_5 = 3.8$  nH, $C_1 = 3.32$  pF, $C_2 = 2.19$  pF, $C_3 = 100$  pF, $C_4 = 0.1$  pF, $C_5 = 1$  nF, $C_6 = 1$  nF。

本部分提出了一种改进型的阻抗匹配网络,以此提高双频带工作环境中的整流天线的效率。

## 2.3 整流电路性能分析

如图 12(a)、(b)所示为整流电路原理图和实物图,整流电路印刷在厚度 $1.524$  mm,介电常数 $3.55$  的 Rogers RO4003 基板上,由于设计采用集总元件代替微带线,可以实现整流电路的小型化。匹配网络的整体

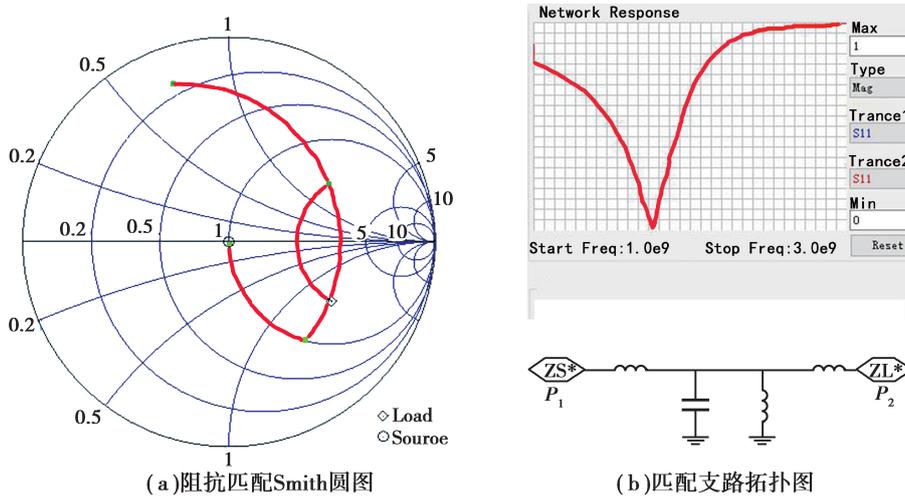


图 8 史密斯圆图工具进行 1.75 GHz 阻抗匹配

Fig.8 Adaptation of impedance by smith chart tool for 1.75 GHz

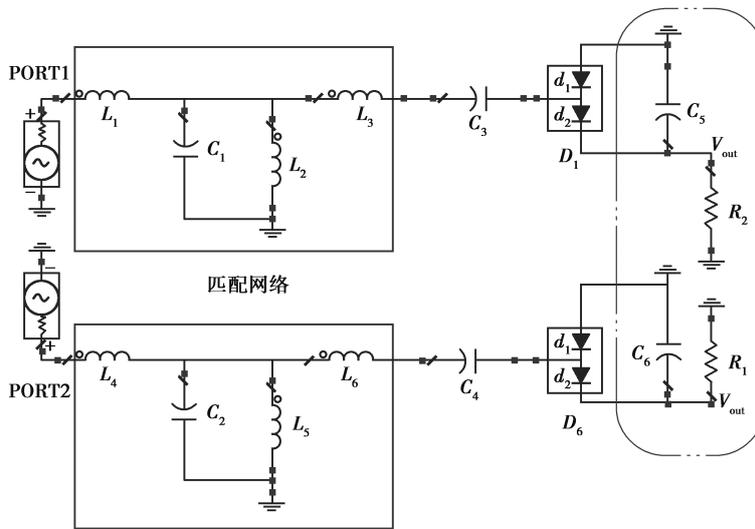


图 9 2 个单分支电路

Fig.9 Two single-branch matching network

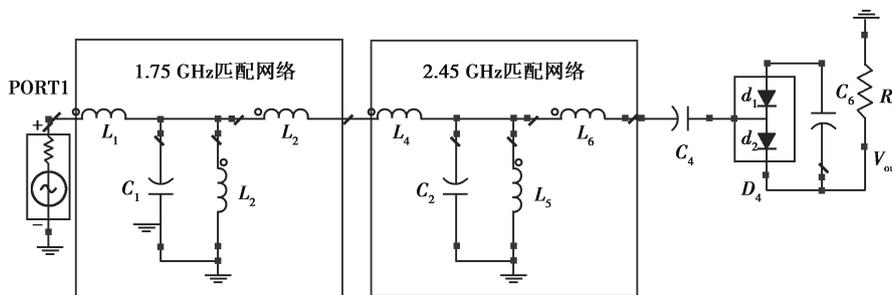


图 10 传统的双频单支路电路拓扑

Fig.10 Conventional single-branch matching network for dual-band

尺寸大小为 13 mm  $\varnothing$  10 mm,整流电路的尺寸大小为 26 mm  $\varnothing$  14 mm。相比之下,传统采用集总元件焊接的整流电路整体尺寸是 32 mm  $\varnothing$  32 mm<sup>[3]</sup>, 19 mm  $\varnothing$  21 mm<sup>[19]</sup>, 58.1 mm  $\varnothing$  13.3 mm<sup>[20]</sup>。

依据如下公式(2)进行 RF-DC 转换效率的计算

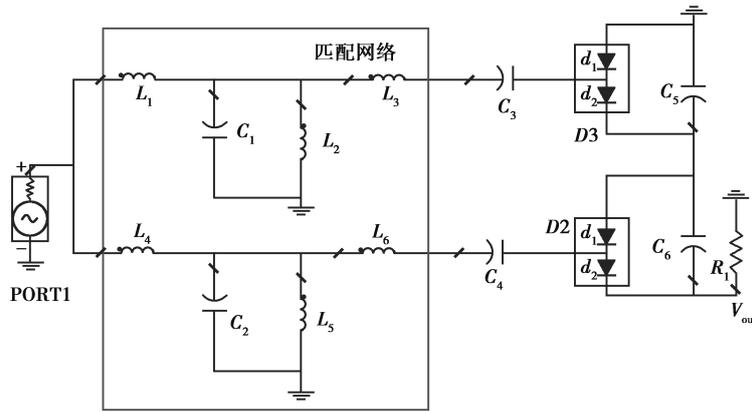


图 11 提出的新型整流电路

Fig.11 Proposed dualbranch matching network

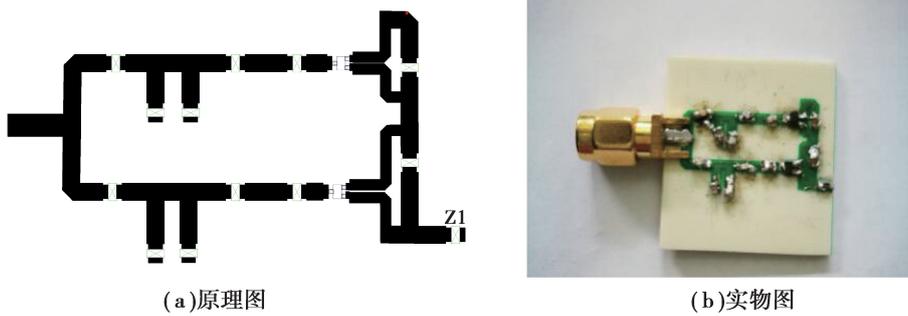


图 12 整流电路

Fig.12 Fabricated prototype of proposed rectifier

$$\eta(\%) = \frac{V_{out}^2}{R_L} \times \frac{1}{P_{in}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中： $\eta$  表示能量转换效率； $P_{in}$  指整流电路输入功率，即接收天线接收到的能量； $R_L$  表示负载； $V_{out}$  指输出电压，即负载两端的电压。为了更好地评估整流部分电路的性能，对整流电路单独进行测试。在整流电路的测量过程中，使用射频信号发生器作为输入到整流电路的输入源代替实际环境中的天线。

图 13(a)所示为输入功率为  $-10$  dBm 时，RF-DC 转换效率随频率变化曲线，从图中可以看出，在 1.75 GHz 和 2.45 GHz 时，整流电路达到最大的能量转换效率。图 13(b)所示，整流电路负载在  $1\text{ k}\Omega \sim 5\text{ k}\Omega$  范围内进行扫描，从而得出取得最大能量转换效率时的负载值，从图中可以看出，在输入功率为  $-10$  dBm 时，当负载取值为  $2.65\text{ k}\Omega$  和  $1.91\text{ k}\Omega$  时达到最大转换效率，分别为 70% 和 57%。

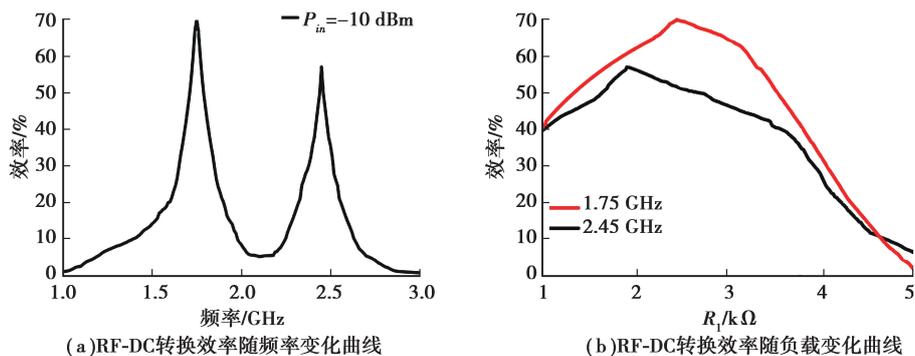


图 13 RF-DC 转换效率随变量变化曲线

Fig.13 RF-DC conversion efficiency versus variables

图 14 为给定的负载条件下,提出的整流电路与传统整流电路在 1.75 GHz GSM 频带和 2.45 GHz WLAN 频带上 RF-DC 转换效率随输入功率变化的对比图,输入功率扫描范围为  $-30$  dBm  $\sim -5$  dBm。从中可以看出,提出的整流电路能量转换效率优于传统整流电路。

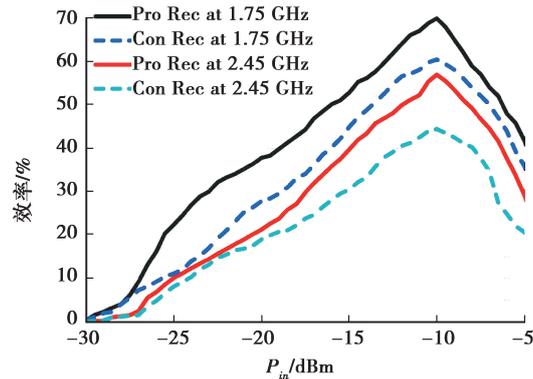


图 14 设计的整流电路与传统整流电路转换效率随  $P_{in}$  变化对比

Fig.14 Performance comparison of proposed rectifier and conventional rectifier versus pin

### 3 整流天线性能分析

设计的双频整流天线实物图如图 15 所示。为测试在不同输入功率下的双频整流天线的 RF-DC 转换效率,使用喇叭天线连接到 RF 信号发生器进行信号发射,并将设计的天线作为接收天线连接到频谱分析仪。通过频谱分析仪记录接收的射频功率,并记录信号发生器相应的发射功率。然后,在相同位置上,接收天线由整流天线替换,如图 16 所示。输入功率扫描范围设为  $-30$  dBm  $\sim -5$  dBm。图 17 所示为设计的双频整流天线 RF-DC 转换效率,从图中可以看到,在 1.75 GHz 和 2.45 GHz,对应输入功率为  $-10$  dBm 时,转换效率取得最大值,分别为 65.34% 和 54.3%。



图 15 设计的双频整流天线实物图

Fig.15 Photograph of rectenna

测量结果和仿真结果之间存在一定的差异,通过分析这些差异可能来自以下 4 个方面:

- 1) 环境温度和电磁场的变化导致二极管的性能出现变化,造成能量损耗;
- 2) SMA 连接器和整流电路的焊点产生外部损耗;

- 3) 耦合电容、二极管及 SMA 接头焊接时引入寄生电容、寄生电感, 并产生相应的电阻效应;  
4) 天线和整流电路匹配过程中造成的损耗以及天线自身产生的损耗。

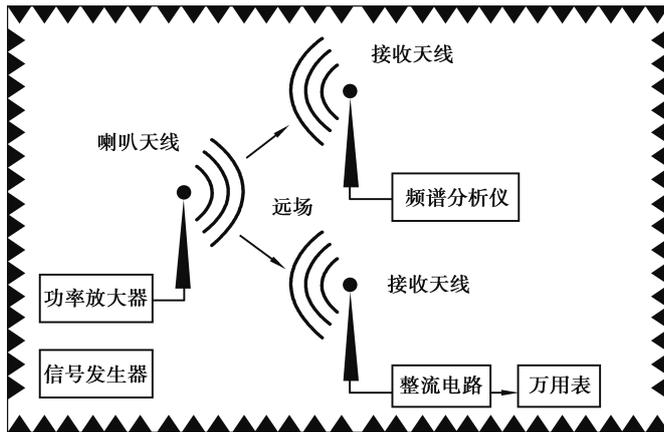


图 16 整流天线测试系统

Fig.16 Rectenna measurement system

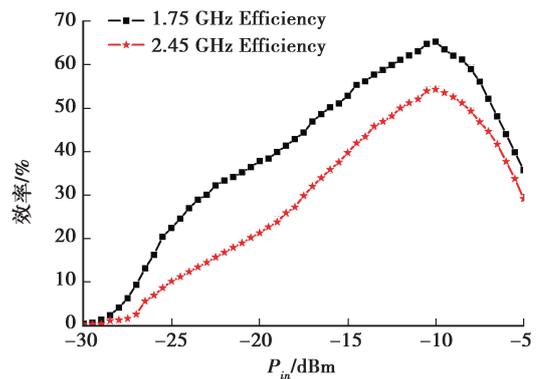


图 17 双频整流天线 RF-DC 转换效率

Fig.17 Conversion efficiency of proposed rectenna

表 2 所示为部分物联网小型电子设备能耗, 依据前面测试结果, 在室内环境中, 设计的整流天线输出功率可达到  $17 \mu\text{W}$ , 大于上述表格中设备的能耗, 所以可以为上述设备提供充足的能量。由此可见, 设计的双频整流天线可以在一些低功耗物联网设备中得以应用。

表 2 部分物联网小型电子设备能耗值

Table 2 Devices consumption comparison with proposed rectenna  $\mu\text{W}$ 

设备	无源 RFID	文献[22]设备	文献[23]设备
能耗	10	15	14

## 4 结论与展望

提出了一种用于射频能量收集的高效新型双频整流天线, 具有较小的尺寸以及较高的能量转换效率, 可以用于小型化物联网设备和无线传感器网络设备供能, 从而解决传感器节点的能源问题。将 2 个单频阻抗匹配网络堆叠到一个电路中, 得到一种新型双支路阻抗匹配网络, 基于该匹配网络, 与传统的双频整流电路相比, 减少了功率损耗, 降低了匹配网络以及整流部分电路的复杂度, 在双频环境下具有更好的能量转换性能。测量结果表明, 在  $-10 \text{ dBm}$  的输入功率下, 设计的双频整流天线在  $1.75 \text{ GHz}$  GSM 频段最大 RF-DC 转换效率为  $65.34\%$ , 在  $2.45 \text{ GHz}$  WLAN 频段最大 RF-DC 转换效率为  $54.3\%$ 。此外, 对仿真和测量结果之间的偏差进行了分析, 便于今后的改进与完善。今后, 将重点研究整流天线的小型化和集成化, 以促进在移动便携设备上射频能量采集系统的应用。

### 参考文献:

- [1] 韦保林, 韦雪明, 徐卫林, 等. 环境射频能量收集技术的研究进展及应用[J]. 通信技术, 2014(4): 359-364.  
WEI Baolin, WEI Xueming, XU Weilin, et al. Development and application of ambient RF energy harvesting technique [J]. Communications Technology, 2014(4): 359-364. (in Chinese)
- [2] Liu C, Wu K, Pei J. An Energy-Efficient data collection framework for wireless sensor networks by exploiting spatiotemporal correlation[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2008, 18(7): 1010-1023.
- [3] Song C, Huang Y, Zhou J, et al. A High-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015, 63(8): 3486-3495.

- [4] Mei H, Yang 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.
- [5] Peter T, Rahman T A, Cheung S W, et al. A novel transparent UWB antenna for photovoltaic solar panel integration and RF energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2014, 62(4):1844-1853.
- [6] 铁欢欢,刘高平.1800 MHz 射频能量收集系统仿真与分析[J].*电子技术应用*,2017,43(6):155-158.  
TIE Huanhuan, LIU Gaoping. Simulation and analysis of 1800 MHz RF energy harvesting system[J]. *Application of Electronic Technique*, 2017, 43(6):155-158.(in Chinese)
- [7] Tissier J, Latrach M, Popovic Z. 1.84 GHz rectenna optimized by source-pull techniques, for ambient RF energy harvesting applications[C]//*Radio Science Conference*. USA:IEEE, 2015:18-23.
- [8] Aboulalaa M, Abdel-Rahman A B, Allam A, et al. Design of a dual-band microstrip antenna with enhanced gain for energy harvesting applications[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2017, 16(99):1622-1626.
- [9] Mimis K, Gibbins D, Dumanli S, et al. Ambient RF energy harvesting trial in domestic settings[J]. *Iet Microwaves Antennas & Propagation*, 2015, 9(5):454-462.
- [10] Piñuela M, Mitcheson P D, Lucyszyn S. Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2013, 61(7):2715-2726.
- [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 & Techniques*, 2006, 54(4):1495-1502.
- [12] Song C, Huang Y, Carter P, et al. A Novel Six-Band dual CP rectenna using improved impedance matching technique for ambient RF energy harvesting [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2016, 64(7):3160-3171.
- [13] Lakhal H, Dhieb M, Ghariani H, et al. Design of a high performance rectenna for wireless powering 2.45 GHz RFIDs [C]//*International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering*. USA: IEEE, 2016:138-145.
- [14] Nimo A, Grgic D, Reindl L M. Impedance optimization of wireless electromagnetic energy harvesters for maximum output efficiency at  $\mu$ W input power [J]. *International Society for Optical Engineering*,2012:26-28.
- [15] Collado A, Georgiadis A. Conformal Hybrid solar and electromagnetic (EM) energy harvesting rectenna [J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers*, 2013, 60(8):2225-2234.
- [16] Ho D K, Kharrat I, Ngo V D, et al. Dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting at GSM 900 MHz and 1800 MHz[C]//*IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*. USA:IEEE, 2017:306-310.
- [17] Niotaki K, Kim S, Jeong S, et al. A compact dual-band rectenna using slot-Loaded dual band folded dipole antenna [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2014, 12(1):1634-1637.
- [18] Sun H, Guo Y X, He M, et al. A dual-band rectenna using broadband yagi antenna array for ambient RF power harvesting [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2013, 12:918-921.
- [19] Kuhn V, Lahuec C, Seguin F, et al. A Multi-band stacked RF energy harvester with RF-to-DC efficiency up to 84% [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2015, 63(5):1768-1778.
- [20] Rethy J V, Danneels H, Smedt V D, et al. A low-power and low-voltage BBPLL-based sensor interface in 130nm CMOS for wireless sensor networks[C]//*Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*. USA: IEEE, 2013: 1431-1435.
- [21] Lu L, Block S T, Duarte D E, et al. A 0.45-V MOSFETs-Based temperature sensor front-end in 90 nm CMOS with a noncalibrated  $\pm 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$   $3\sigma$  relative inaccuracy from  $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  [J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs*, 2013, 60(11):771-775.