



环境 WiFi 能量采集系统的匹配网络与整流电路设计

摘要

设计了一款针对 WiFi 信号的环境能量采集系统,工作频率范围从 2.4 GHz 到 2.485 GHz.该系统采用了 4 倍压整流电路,并设计了从天线到整流电路的宽带匹配电路,提升了能量采集的效率.设计的宽带匹配电路在 WiFi 工作频率范围内, S_{11} 均小于-10 dB.整流电路可将采集信号增加 4 倍,能有效提高 RF-DC 转换效率.测试结果表明,所设计的电路达到了设计要求,在-10 dBm 的输入功率下,达到了 40%的 RF-DC 转换效率,并使超级电容在 30 min 内采集到了 257 mV 的电压.

关键词

环境能量采集;整流电路;阻抗匹配;射频直流转换效率

中图分类号 P466

文献标志码 A

收稿日期 2016-11-24

资助项目 浙江省教育厅科研计划(Y201121456)

作者简介

徐力翔,男,硕士生,研究方向为无线能量采集.479959241@qq.com

张晓红(通信作者),女,硕士,讲师,研究方向为无线能量采集.xhzhang@hdu.edu.cn

¹ 杭州电子科技大学 电子信息学院,杭州,310018

0 引言

近年来,智能家居、智能医疗保健、环境监测等领域中低功耗的电子器件需求大量增加,这些器件的能耗问题引起了广泛的关注.传统上使用可更换的电池来作为电子器件的能量来源,但在某些难以触及或危险的领域,更换电池变得不切实际,所以近年来发展火热的新能源例如太阳能、风能等成了这些低功耗电子器件的不二选择.但这些新能源也存在一定的缺陷,例如在夜晚或者没有太阳的日子里,太阳能装置就无法工作.与传统的新能源相比,无处不在的环境射频能量具有其独特的优势.1)来源广泛:环境射频能量可以从周围无处不在的无线发射器获得,包括移动电话、手持无线电设备、移动基站、电视/无线广播台、无线路由器等;2)能量稳定:例如电视广播信号,能量采集系统可以进行一整天的采集而不必担心信号中断消失^[1].所以,利用这些“免费”并且取之不竭的环境射频能量,是一项具有广阔发展前景的课题,大量射频能量采集的构想被提了出来.文献[2]提出了一个双频段的射频能量采集系统:在 10 dBm 的输入功率下,工作在 2.1 GHz 能得到 1.9 V 的输出电压和 24%的最大效率;工作在 2.45 GHz 能得到 1.7 V 的输出电压和 19%的最大效率.文献[3]提出的射频能量采集系统在 20 dBm 的输入功率下,能达到最高 68%的效率.但以上这些设计要求的输入信号功率较高,不适合 WiFi 信号的采集.

WiFi 是目前最常用的无线系统,且经过近年来无线网络的发展,WiFi 网络已无处不在^[4].近几年,对周围 WiFi 信号采集的研究已成为周围能量采集的热点之一^[5-7].本文设计了一款基于周围 WiFi 信号的能量采集系统,可有效采集周围 WiFi 能量.

1 基本原理

周围无线能量采集系统主要由天线、匹配网络和整流电路等组成,其框图如图 1 所示.其中天线的主要功能是接收周围环境中的射频能量;整流电路的作用是将射频能量转换为直流能量输出;匹配网络用来将整流电路的输入阻抗匹配到天线的输出阻抗,以达到最大功率传输的目的.

1.1 RF-DC 整流电路

RF-DC 整流电路是整个系统的核心部分,对于能量采集系统来

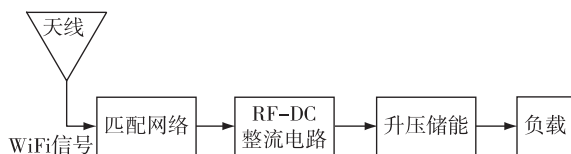


图1 能量采集系统框图

Fig. 1 Block diagram of the proposed energy harvesting system

说,射频输入能量很小,必须选择零偏置二极管以保证最大的转换效率.本文选择了 SMS-7630 这款肖特基二极管来作为整流器件,它具有极短的反向恢复时间,可以高速切换开关状态,且为零偏置的二极管.

能量采集系统 RF-DC 转换效率如式(1)和(2)所示:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_L}, \quad (2)$$

P_{in} 是射频能量的入射功率, P_o 为直流输出功率.由式(2)可得,对于固定负载 R_L ,输出电压 V_o 越高,转换效率越高.本文采用了格赖纳赫倍压电路,在整流的同时成倍地输出电压^[5].图2为典型倍压电路原理示意.

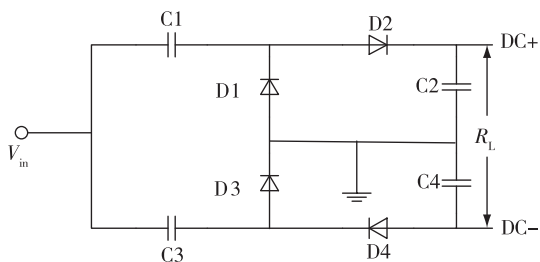


图2 格赖纳赫倍压电路

Fig. 2 Greinacher rectifier

如图2所示,当输入电压 V_{in} 为负时,D1 导通,D2 截止, V_{in} 为 C1 充电,可以得到:

$$V_{C1} = V_{in^-} - V_{th}, \quad (3)$$

其中 V_{C1} 是 C1 两端的电压, V_{th} 是二极管上 D1 的压降.当 V_{in} 为正时,D1 截止,D2 导通,C1 和 V_{in} 一起为 C2 充电,可以得到:

$$V_{C2} = V_{C1} + V_{in^+} - V_{th} = 2V_{in} - 2V_{th}, \quad (4)$$

V_{C2} 是 C2 两端的电压.由于采用了零偏置的二极管,所以 $V_{th} = 0$,C2 上的电压可以表示为

$$V_{C2} = V_{C1} + V_{in^+} - V_{th} = 2V_{in}. \quad (5)$$

由电路的对称性可得 C4 上的电压为:

$$V_{C4} = -2V_{in}, \quad (6)$$

所以在采用零偏置肖特基二极管的情况下,输出电压 U_o 为

$$U_o = V_{C2} - V_{C4} = 4V_{in}, \quad (7)$$

从式(7)可以看出,采用格赖纳赫倍压整流电路最后能输出 4 倍的输入电压,效率较之单个二极管整流有了很大的提升.

1.2 匹配网络设计

WiFi 信号总共有 14 个信道,通常采用 IEEE 802.11 b/g/n 标准,频率范围为 2.4~2.485 GHz,共 83.5 MHz.由于整流电路由二极管构成,在整个 WiFi 频带内,整流电路阻抗会随频率的不同而略有不同,如图3所示.对于射频系统来说,天线阻抗为 50Ω ,需要在整个 83.5 MHz 的 WiFi 频带内将 50Ω 阻抗与整流电路阻抗进行匹配.

为了实现宽带匹配,采用如图4所示的宽带匹配网络进行匹配,采用 ADS 软件进行了匹配电路的仿真设计.表1所示为本文设计的匹配电路尺寸,图5所示为匹配电路仿真结果.由图5可见:2.443 GHz 时达到了最佳匹配, S_{11} 为 -29.248 dB ;在整个 WiFi 工作频段,匹配电路 S_{11} 均小于 -10 dB ,保证了至少有 90% 的射频能量能够顺利传输到整流电路中.在该结构中,电容的取值并不会影响电路的匹配,只会影响到充放电的快慢,而各微带线的尺寸及位置和电感值,则对匹配有较大影响.

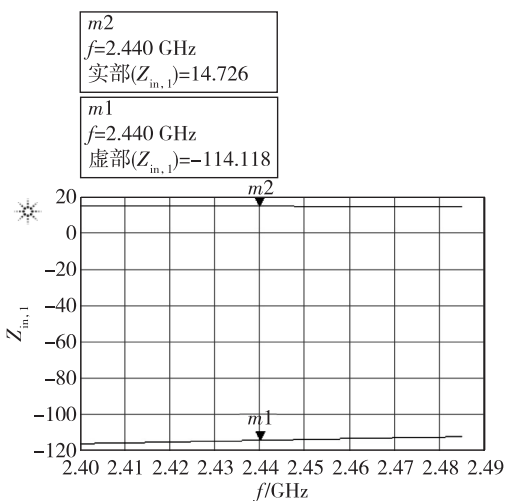


图3 整流电路的输入阻抗

Fig. 3 Input impedance of the proposed rectifier circuit

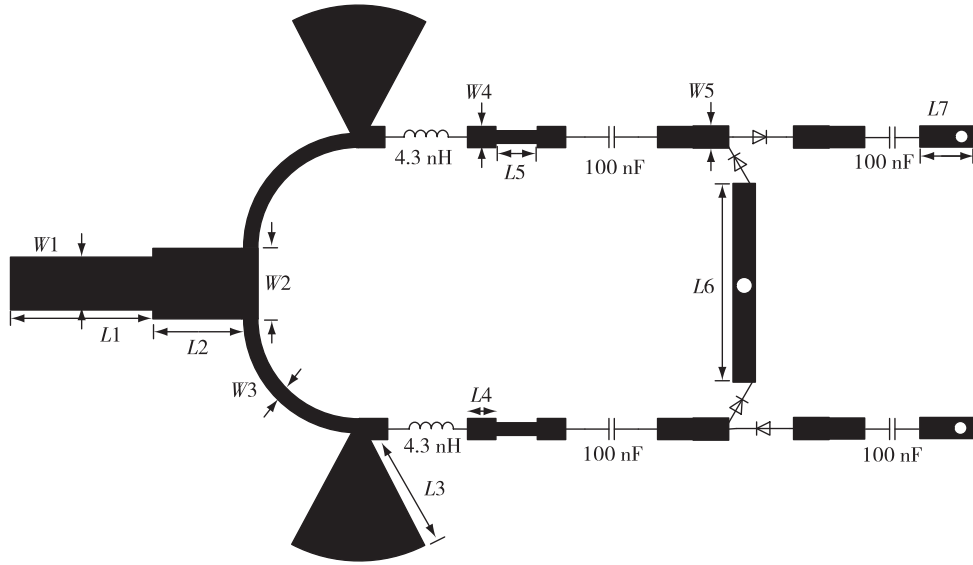


图 4 系统结构

Fig. 4 Structure of the proposed system

表 1 系统的尺寸参数

Table 1 Sizes of the proposed energy harvesting system

mm

W1	W2	W3	W4	W5	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
0.885	1.830	0.300	0.500	0.504	6.000	5.000	5.218	1.086	1.262	3.000	1.425

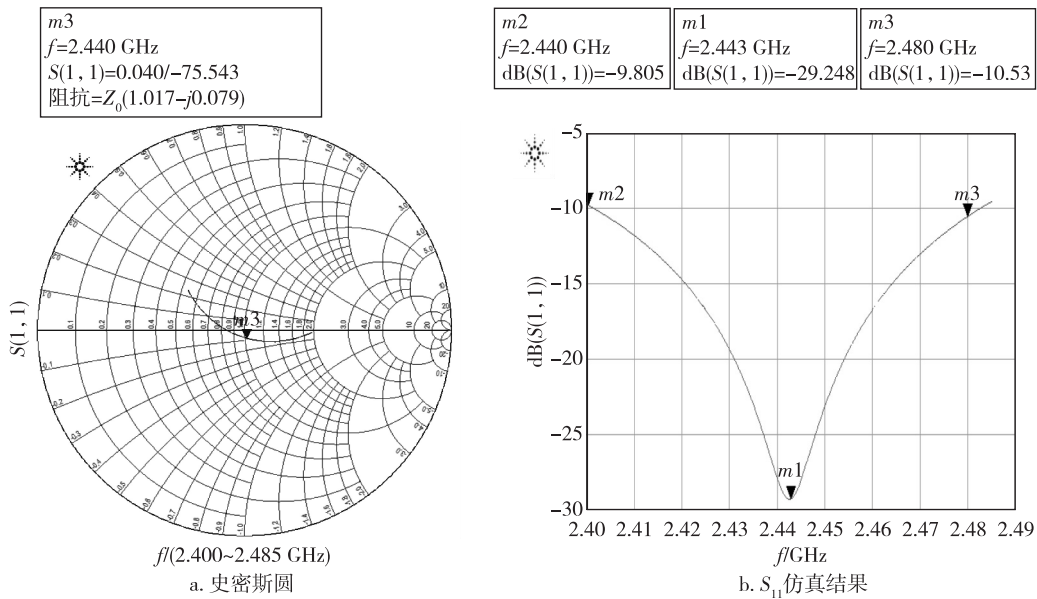


图 5 史密斯圆 S_{11} 仿真结果

Fig. 5 Smith chart and simulated S_{11}

2 测试结果及分析

根据仿真结果,本文采用介电常数为 6.15,板厚为 25 mil 的 RO3206 高频板设计实现了周围 WiFi 能

量采集电路,如图 6a 所示.匹配电路测试结果如图 6b 所示,在整个 WiFi 频段内, S_{11} 均小于 -10 dB,最佳匹配点是 2.467 5 GHz, S_{11} 为 -24.579 dB.与仿真结果基本一致,达到了设计要求.

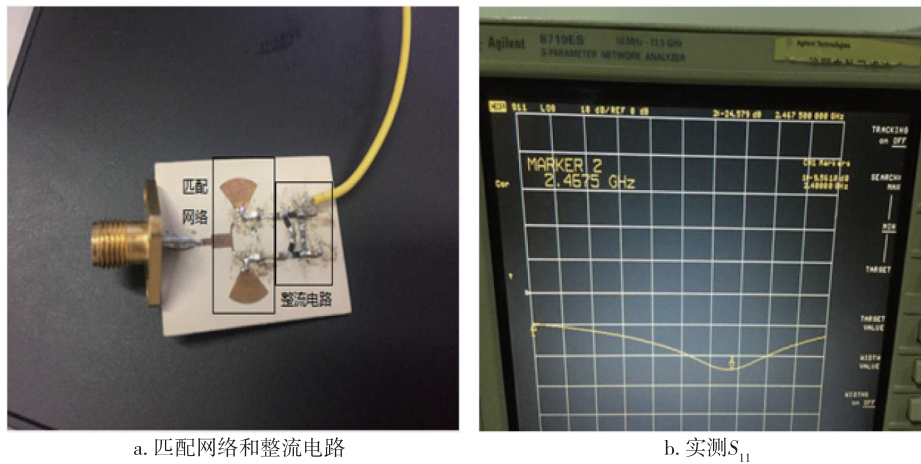


图6 匹配网络和整流电路以及矢量网络分析仪实测 S_{11}

Fig. 6 The matching network and rectifier (a) and the measured S_{11} by vector network analyzer (b)

由于射频能量采集系统大多数被应用于无线传感器网络节点上,而传感器具有一个工作时间占空比^[6],这就要求当传感器进入睡眠状态时,射频能量采集系统能将能量储存起来,等到传感器工作时,再为传感器供电.本系统采用的储能器件是超级电容.与普通电池相比,无论是充放电速度,还是可充放电的次数,超级电容都要更胜一筹.此外,也可以使用一些专用的充电泵 IC 和升压 IC 来进行能量管理,但成本更高,电路也更为复杂.

将图 2 中的 DC+和 DC-分别接到超级电容的两端,然后使用 Agilent E8267D 矢量信号发生器作为射频源,输入频率为 2.465 GHz,不同功率的连续波,为容值 0.5 F 的超级电容充电 30 min,如图 7 所示,测试结果如表 2 所示.



图7 使用矢量信号发生器测试

Fig. 7 Measurement setup with a vector signal generator

V_C 是充电 30 min 后超级电容两端的电压. $V_{DC+} - V_{DC-}$ 是输出端接了 10 k Ω 负载的输出电压,并由此

可以计算得到电流 I . η 是 RF-DC 的转换效率,用式 (1)可以计算得出.可以看出随着输入功率 P_{in} 的增加, η 也在增加.

表 2 不同输入功率的测试结果

Table 2 Test results with different input powers

参数	输入功率 P_{in}/dBm		
	-30	-20	-10
V_C/mV	4.1	37.9	257
$(V_{DC+} - V_{DC-})/\text{mV}$	12	100	637
$I/\mu\text{A}$	1.2	10	63.7
$P_o/\mu\text{W}$	0.014 4	1	40.576 9
$\eta/\%$	1.44	10	40.576 9

假设传感器节点的平均功耗为 100 μW ^[8],以输入功率 -20 dBm 为例,传感器可以工作的时间(单位:s)是:

$$\frac{1}{2} \times C \times V_C^2 = P \times t \longrightarrow t = \frac{CV_C^2}{2P} \approx 3.6. \quad (8)$$

此外,本系统也测试了把无线路由器作为射频源的性能.要从无线路由器接收 WiFi 信号,首先需要一款合适的天线.天线的增益、带宽、方向性等因素直接影响到天线输入到匹配网络中的能量.本文选择了一款增益为 10 dBi 的全向天线.将天线连接到能量采集系统后放置到路由器旁,进行如图 8 的测试,同样为超级电容充电 30 min, V_C 值如表 3 所示.

由表 2 和表 3 对比可得,使用路由器作为射频信号源,结束充电后的电压 V_C 下降得十分明显,主要原因是实际 WiFi 信号是跳频间隔发射,且由于天



图 8 使用路由器测试

Fig. 8 Measurement setup with a router

表 3 不同路由器工作模式测试

Table 3 Test results with different router work modes

工作模式	V_C/mV
待机	17.0
高数据传输	31.6

线的原因,采集到的 WiFi 信号功率较小.

3 结束语

本文设计了一款针对 WiFi 信号的周围能量采集系统,包括倍压整流电路及匹配电路,并进行了加工测试,制作了一块 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 大小的能量采集模块,分别用矢量信号发生器和路由器对系统性能进行了测试,30 min 内 0.5 F 的超级电容最多分别能采集到 257 mV 和 31.6 mV,可有效地采集周围 WiFi 信号并转换为直流功率.

Design of matching network and rectifier for an ambient WiFi energy harvesting system

XU Lixiang¹ ZHANG Xiaohong¹ YOU Bin¹ LUO Guoqing¹

¹ School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018

Abstract An ambient WiFi energy harvesting system is presented in this paper, with operating frequency from 2.4 GHz to 2.485 GHz. A voltage multiple rectifier is used in this design, and a broadband matching network for the circuit from antenna to rectifier is proposed to improve the efficiency of energy harvesting. S_{11} of the proposed broadband matching circuit is less than -10 dB within the WiFi working frequency range. The harvesting signal can be increased by 4 times through the rectifier circuit, thus effectively improve the RF-DC conversion efficiency. Experiment results show that, with an input power of -10 dBm , the design achieves 40% of RF-DC conversion efficiency and the super capacitor harvests voltage of 257 mV in 30 minutes.

Key words ambient WiFi energy harvesting; rectifier; impedance matching network; RF-DC conversion efficiency

参考文献

References

- [1] Nishimoto H, Kawahara Y, Asami T. Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors, 2010, 43(2): 1282-1287
- [2] Khansalee E, Zhao Y, Leelarasmee E, et al. A dual-band rectifier for RF energy harvesting systems [C] // 11th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2014: 1-4
- [3] Zhitou 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
- [4] Cheng Y C, Chawathe Y, Lamarca A, et al. Accuracy characterization for metropolitan-scale WiFi localization [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, 2005: 233-245
- [5] Olgun U, Chen C C, Volakis J L. Design of an efficient ambient WiFi energy harvesting system [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2012, 6(11): 1200-1206
- [6] Alneyadi F, Alkaabi M, Alketbi S, et al. 2.4 GHz WLAN RF energy harvester for passive indoor sensor nodes [C] // IEEE 11th International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE), 2014: 471-474
- [7] Kadir E A, Hu A P, Biglari-Abhari M, et al. Indoor WiFi energy harvester with multiple antenna for low-power wireless applications [C] // IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2014: 526-530
- [8] 余义斌, 余江, 王贵, 等. 传感器节点环境能量的收集方法 [J]. 广东海洋大学学报, 2007, 27(6): 93-96
YU Yibin, YU Jiang, WANG Gui, et al. Methods of scavenging ambient energy for sensor node [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2007, 27(6): 93-96