

# 新型射频能量收集系统设计与分析

张瑜, 徐庶

(河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007)

**摘要:**随着无线传感器网络等电子微系统的发展,作为能量源的电池满足不了长久供电的需求.利用周围环境中的射频能量为自身提供电能已经越来越受到科研工作者的关注.针对目前常用射频能量收集系统转换效率较低的不足,提出了一种由超宽带天线、匹配网络、整流升压电路等组成的新型能量收集系统.利用HFSS软件对超宽带天线进行仿真优化,使得该天线在宽频带下具有较好的特性;通过整流升压电路在不同负载下的整流效率分析,确定了整流器转换效率较高的负载取值范围.新型射频能量收集系统的效率为13.5%,比常用的其他射频能量收集系统的效率提高了将近6%.

**关键词:**无线通信;无线能量传输;射频能量收集;整流效率

**中图分类号:**TN710

**文献标志码:**A

近年来,随着无线通信技术的快速发展,越来越多的基站、信号发射塔等设备被建起.这些射频发射源发出的能量充斥在生活环境中.随着硅微电子技术在功耗方面取得较大突破,越来越多的微瓦级电子微系统相继出现,使得此类系统从空间中收集能量来供自身工作成为可能<sup>[1]</sup>.作为从空间环境中收集能量代表的无线传感器网络在军事、环境监测、建筑物状态监控和大型企业的安全监测等诸多领域得以应用<sup>[2]</sup>,然而,无线传感器网络主要能量来源的电池在体积、使用寿命等方面有很大缺陷,不利于减小系统的体积和长久为系统供电,所以采用电池为各种传感器节点供电的方式是不现实的<sup>[3]</sup>.这就需要传感器本身要具有获取空间能量的能力,为自身工作提供能量.此外,利用无线能量传输技术可为直升机供电、管道中机器人等进行无线充电,其应用前景可见一斑<sup>[4-6]</sup>.

经过十余年的研究和发展,国内外射频能量收集技术已取得了一定的成果<sup>[7-9]</sup>,尤其在关键的天线设计方面的成果较多,如设计了小型化超宽带圆形天线、超宽频带小尺寸对数周期偶极子天线、宽频带多频微带天线等<sup>[10-12]</sup>.然而,目前环境中射频能量收集方面存在一些瓶颈问题,尤其表现在灵敏度和效率方面.如Olgun等人设计的一款天线,可以收集室内的射频能量,其灵敏度可以达到-20 dBm,但此系统的效率仅为7.6%<sup>[13]</sup>.为此,设计一种新型射频能量收集系统,着力提高其转换效率.

## 1 系统构成

针对已有的射频能量收集系统在灵敏度以及转换效率方面的不足,提出了一种新型的射频能量收集系统.该系统由超宽带接收天线、匹配网络、整流升压部分组成.工作机理为:超宽带接收天线可以接收周围环境中的射频信号,将射频信号能量转化为高频电流;高频电流流进匹配网络,在电感电容的作用下,使得高频电流无损耗地流进整流升压电路,从匹配网络流出的电流流进整流倍压电路,在二极管和电容的共同作用下,将微弱的交流电进行整流升压,输出较高电压的直流电.

### 1.1 超宽带接收天线

目前用于射频能量收集方面的超宽带接收天线报道较少,满足宽频带、全向辐射、性能稳定以及小型化

收稿日期:2016-05-09;修回日期:2016-11-16.

基金项目:国家自然科学基金(61077037)

作者简介(通信作者):张瑜(1963-),男,河南沁阳人,河南师范大学教授,主要研究电磁波与微波技术理论与应用,  
E-mail:hsdzhangyu@126.com.

要求的文献更少.

本文设计的超宽带天线是方形微带贴片天线,不仅符合宽频带(这里选用频带为 1.75 ~ 2.95 GHz)、全向辐射要求,而且也满足结构简单、性能较好、稳定性高的要求.3 个关键参数为:工作频率  $f_m = 2.35$  GHz;介质板材料的相对介电常数  $\epsilon_r = 3.38$ ;介质层厚  $H = 5$  mm.经计算得出微带贴片的长  $L_2 = 37.10$  mm,宽  $W_2 = 43.13$  mm,微带天线参考地的长  $L_1 = 62$  mm,宽  $W_1 = 72$  mm,天线采用同轴线馈电.设计的微带天线结构与版图如图 1 所示.

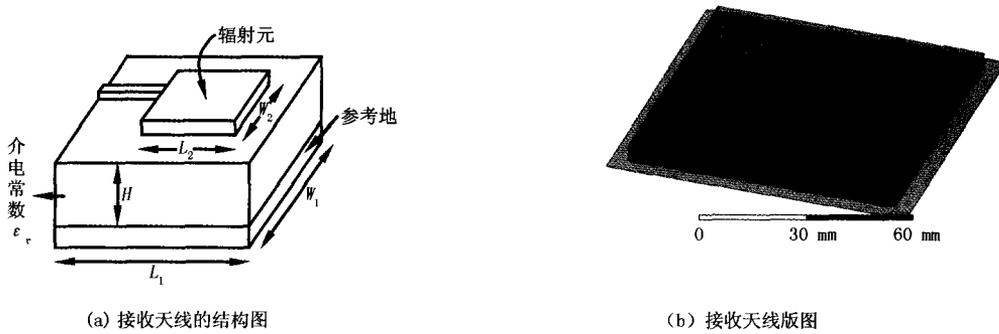


图 1 接收天线结构

对设计的宽带天线进行仿真模拟,得出仿真曲线(图 2 实线);将设计的宽带天线进行加工,做出实物,在办公室环境下连接频谱分析仪进行测试得出其增益随频率变化的曲线(图 2 虚线).从图 2 中可以看出,实测与仿真结果基本吻合,频带范围在 1.5 ~ 4.0 GHz 内信号强度均满足大于 -6 dBm,而设计的超宽带接收天线的灵敏度恰好是 -6 dBm.查阅文献可知环境中的射频段主要在 1.6 ~ 3.6 GHz 范围内,此宽带天线可以最大程度的对周围环境的射频能量进行收集<sup>[14]</sup>.

该宽带天线的电压驻波比(VSWR)在 HFSS 软件中的仿真曲线如图 3 所示.从图 3 中可以知道,电压驻波比在 2.3 ~ 2.4 GHz 频带间保持在 1 ~ 2 之间.查阅资料可知,电压驻波比在 1 ~ 2 之间,可以说明天线性能良好<sup>[15]</sup>.

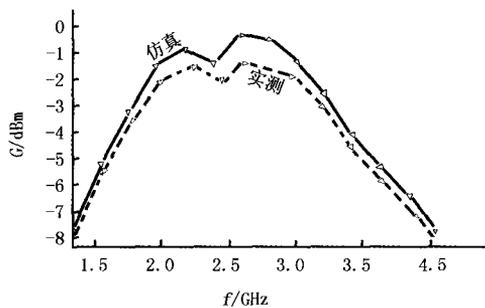


图 2 超宽带接收天线的增益曲线

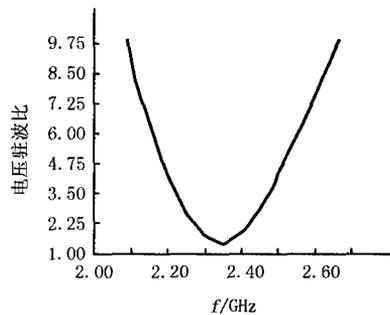


图 3 超宽带接收天线的驻波比曲线图

远功率传输的弗里斯公式<sup>[16]</sup>

$$P = P_t \left( \frac{c_0}{4\pi R f} \right)^2 G_n, \tag{1}$$

式中,  $P_t$  为射频源发出的功率,  $c_0$  为真空中射频波长,  $R$  为接收天线发射源之间的距离,  $G_n$  为接收天线功率增益.

接收天线的整流效率

$$\eta_1 = \frac{V^2/R}{P}, \tag{2}$$

式中,  $V$  是负载  $R$  两端的电压,  $P$  是天线接收的功率.

根据天线效率的计算公式(1)和(2)可以得到超宽带天线的效率曲线,如图4所示.图4给出了天线的效率曲线,可以看出天线在不同频率点效率不同,曲线大致呈现先升后降的趋势,频率由1.75 GHz增加到2.35 GHz,对应的效率曲线呈现升高的趋势,且上升趋势越来越不明显;这是由于在此频段天线的输入信号强度越来越大,在频率2.35 GHz有最大值,约为34.8%.当频率从2.35 GHz增加到2.8 GHz时,对应的效率曲线呈现下降趋势,说明在该频段内天线接收到的输入信号强度降低.

## 1.2 匹配网络

匹配网络是射频能量收集系统必不可少的部分,是超宽带接收天线与整流升压电路的纽带和桥梁.其作用是使得电流无损耗的从超宽带天线经匹配网络流进整流升压电路.减小在匹配网络中的能量损耗对提高射频能量收集系统的整体转换效率有重要作用.匹配网络结构电路如图5所示.匹配网络由电感( $L_1, L_2$ )和可调电容( $V_1, V_2$ )组成,这里电感 $L_1 = 50$  mH,  $L_2 = 100$  mH,可调电容 $V_1, V_2$ 可以调节大小.

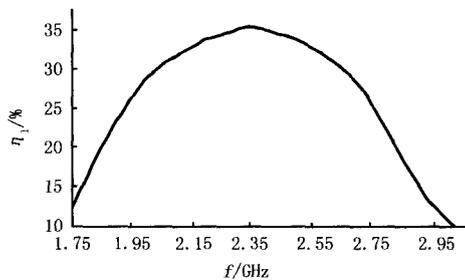


图4 超宽带接收天线的效率曲线

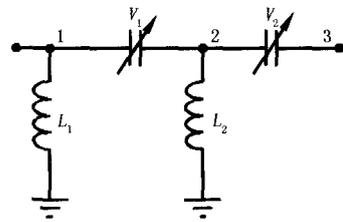


图5 匹配网络电路图

根据选频网络的相关公式和经验公式<sup>[17-19]</sup>得出谐振曲线函数 $N(f)$ 的数学表达式

$$N(f) = \left(1 + Q_o^2 \left(\frac{2\Delta f}{f_o}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中, $Q_o$ 为品质因数, $f_o$ 为谐振频率, $\Delta f$ 为上下限频率差.谐振频率 $f_o$ 与电感 $L$ ,电容 $C$ 满足关系

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}, \quad (4)$$

品质因数

$$Q_o = \frac{1}{g_{oo} \omega_o L} = \omega_o C / g_{oo}, \quad (5)$$

式中, $g_{oo}$ 表示谐振电导,这里取 $g_{oo} = 50 \Omega$ , $\omega_o$ 是角频率.

又因为上限频率 $f_1$ ,下限频率 $f_2$ 之间满足关系式

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{f_o}{Q_o}, \quad (6)$$

$$f_1 = f_2 + N(f) / \Delta f, \quad (7)$$

经公式(3)~(7)计算可得,经第一次选频后上下限频率分别为2.95 GHz,1.75 GHz;第二次选频后其上下限频率分别为2.9 GHz,1.8 GHz.

具体工作过程:

从超宽带天线流出的高频电流流进匹配网络,高频电流经结点1,流进电感 $L_1$ 和可调电容 $V_1$ ,在电感 $L_1$ 的通直流阻交流、可调电容 $V_1$ 的通交流阻直流的作用下对其进行第一次频率筛选.选出频率范围为1.75~2.95 GHz的高频电流.此时经过第一次频率筛选的高频电流,经结点2流进电感 $L_2$ 和可调电容 $V_2$ .在电感 $L_2$ 的通直流阻交流、可调电容 $V_2$ 的通交流阻直流的作用下,进行二次筛选.从结点3流出的是经过二次频率筛选的高频电流,其频率范围约为1.80~2.9 GHz.

其作用是从包含各种不同频率信号中选出有用信号、抑制干扰信号,相当于一个带通滤波器的功能.

### 1.3 整流升压

整流升压是射频能量收集系统较为重要的环节. 宽带天线将周围环境中的射频能量转换为高频电流. 高频电流经匹配网络流进整流升压电路. 该环节使微弱的高频电流变为较强的直流电流. 该直流电积累到一定程度可以为负载提供电能.

整流升压电路的整流效率

$$\eta_2 = \frac{P_{dc}}{P_{av}} = \frac{V_{dc}^2}{R_l P_{av}}, \quad (8)$$

式中,  $V_{dc}$  是负载  $R_l$  两端的电压,  $P_{av}$  是负载末端的功率.

为了利用 Multisim 软件对整流升压电路在不同负载下的整流效率进行仿真, 特选取负载电阻为  $0.25 \text{ k}\Omega$  的倍数,  $1.0 \sim 7.0 \text{ k}\Omega$  共 25 个点进行仿真, 结果如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 整流效率随负载电阻的增大而呈明显上升趋势, 当负载电阻达到  $2.5 \text{ k}\Omega$  后, 其整流效率达到  $37\%$ ; 随着阻值的增加, 整流效率基本保持不变, 效率值在  $37\%$  左右; 最大整流效率点出现在负载为  $3.5 \text{ k}\Omega$  时, 较相关的文献记载, 其效率显著提高<sup>[20]</sup>. 可以筛选出该系统的最佳负载电阻.

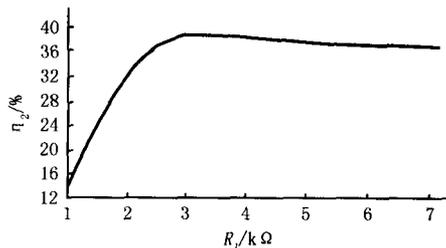


图6 整流升压电路在不同负载下的整流效率曲线

## 2 系统效率

系统效率是指宽带天线、匹配网络、整流升压构成的整体的转换效率, 其计算公式为

$$\eta_0 = \eta_1 \times \eta_2. \quad (9)$$

灵敏度和转换效率是环境射频能量收集的两大难题, 针对这两大难题, 本文进行了数据的计算和软件的仿真. 在数据计算的基础上经仿真得出整个能量收集系统的效率(见图7). 在输入信号强度为  $1 \text{ mW}$  时, 其效率约为  $6\%$ , 输入信号功率在  $1 \sim 5 \text{ mW}$  时, 系统的转换效率有个较明显的上升趋势, 效率接近  $13\%$ , 当输入信号强度达到  $7 \text{ mW}$  时, 系统转换效率达到最大的  $13.5\%$ , 此后, 随着信号能量的不断增强, 系统的转换效率始终保持在  $13.5\%$  左右, 由此可见, 该系统在不同输入信号强度下, 其整流效率不尽相同, 随着信号强度的增加而增加, 达到峰值后, 基本不变. 另一方面, 图7(b)中曲线给出了频率对系统转换效率的影响. 频率在  $1.75 \text{ GHz} \sim 2.35 \text{ GHz}$  间时, 系统整流效率呈上升趋势, 在  $2.35 \text{ GHz}$  点效率值最大, 约为  $13.4\%$ ; 频率超过  $2.35 \text{ GHz}$  后, 系统效率呈降低状, 这与宽带天线的整流效率曲线相吻合.

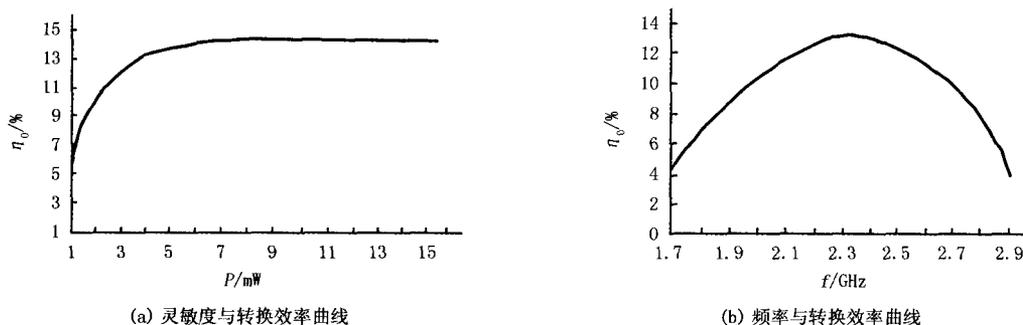


图7 系统转换效率与灵敏度、频率关系图

此外, 设计的射频能量收集系统的转换效率较已有转换效率在相同输入信号强度下进行了对比(见图8). 已有转换效率曲线整体趋势是先增加后趋于平缓的. 这说明已有的能量收集系统的转换效率随着输入信号能量的增强逐渐变大, 达到某一数值后, 在信号强度增强时, 其转换效率保持基本不变. 这是因为当输

入信号电压小于二极管的阈值时,二极管截止,此时系统中只有非常微弱的电流,系统效率很小接近于零.随着输入信号的增加,电压值大于二极管的阈值,二极管导通,系统中电流强度增加,系统效率增大.当输入信号一直加大,达到二极管两端截止电压时,系统效率不再增加.在输入信号强度相同的情况下,本系统的转换效率较高,或者说在同样的转换效率下,本系统的灵敏度较高.

为了进一步验证该系统的正确性,对系统进行了仿真,得出频率与效率曲线;为了验证该系统的实用性,对系统进行了实际测试(见图9),测试环境在办公室内.实测系统包括接收天线、印刷电路和接收机;接收天线将办公室环境中的射频信号由电磁波转化为高频电流信号,高频电流信号流进印刷电路(整流升压),以曲线的形式在接收机显示屏上显示出来.从图9(b)中可以看出,实测结果和仿真结果基本吻合,说明设计的能量收集系统在理论上是正确的.曲线蜿蜒曲折、变化不一,反映出系统效率随频率变化没有规律.这是由系统本身内部因素(二极管的阈值、内部损耗、通频带等)所决定的.系统在频率点2.35 GHz处效率取得最大值13.5%,频带范围1.90~2.85 GHz内其效率在10%~13.5%之间.

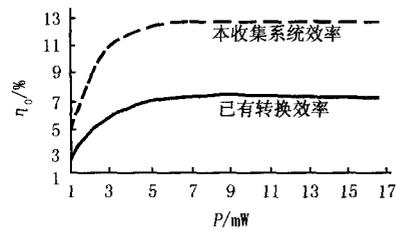
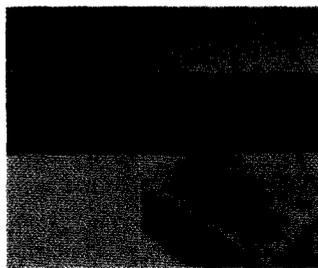
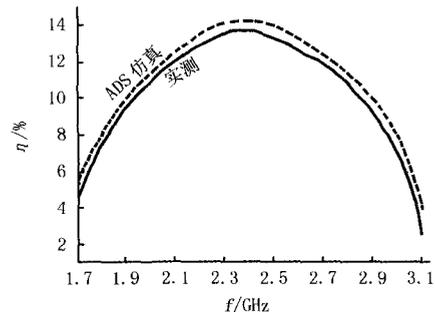


图8 系统转换效率对比图



(a) 系统实测环境图



(b) 仿真与实测效率曲线图

图9 系统实测环境和仿真与实测效率曲线

### 3 结论

针对目前射频能量收集效率较低的难题,设计一种新型射频能量收集系统.用 HFSS 进行仿真、优化,并对仿真结果进行了简单分析.仿真结果表明:在整流效率上,较已经发表的相关文献记载的数据又有了新的提升;在宽带天线上,实现了较宽的频带,天线尺寸也有所减少.此外,仿真曲线与实测结果曲线基本吻合,从理论上佐证了本系统的正确性;实测结果说明本系统具有较高的效率,具有较好的应用前景.

### 参 考 文 献

- [1] HUANG T C, HSIEH C Y, YANG Y Y, et al. A Battery Free 217 mW Static Control Power Buck Converter for Wireless RF Energy Harvesting With Calibrated Dynamic On/Off Time and Adaptive Phase Lead Control[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(04): 852-862.
- [2] WAN Z G, TAN Y K, YUEN C. Review on Energy Harvesting and Energy Management for Sustainable Wireless Sensor Networks[C]. IEEE 13th International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2011: 12-18.
- [3] PRRADISO J A, STARNER T. Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics[J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1): 18-27.
- [4] BROWN W C. Experiments Involving a Microwave Beam to Power and Position a Helicopter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1969, 5(5): 692-702.
- [5] 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.
- [6] 王鹏飞, 肖剑山, 李满天, 等. 面向微小型机器人的 5.8GHz 微波能量传输系统[J]. 机器人, 2010, 32(4): 529-533.
- [7] CHOMORA M, HIROYUKI A, APOSTOLOS G, et al. DTV Band Micropower RF Energy-Harvesting Circuit Architecture and Performance Analysis[J]. IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications, 2011, 36(5): 561-567.
- [8] OH S, WENTZLOFF D D. A-32dBm Sensitivity RF Power Harvester in 130 nm CMOS[J]. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposi-

- um,2012(07):483-486.
- [9] 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,2014,47(04):359-364.
- [10] 钟玲玲. 超宽带圆形天线及其小型化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [11] 李黎,李睿,居美艳. 超宽频带小尺寸对数周期偶极子天线设计分析[J]. 电子技术设计与应用,2011(10):28-29.
- [12] 潘勇,熊江,李潘. 一种新型宽频带多频微带天线设计[J]. 电讯技术,2015,55(4):390-394.
- [13] 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.
- [14] 高远. 无线电频率划分简介[J]. 上海计量测试,2008(01):31-34.
- [15] 房志江. 小型化及多频段天线技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [16] 张瑜. 电磁波空间传播[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [17] 马学文,朱名日. GSM 通信系统中选频网络及天线电路的设计研究[J]. 通信与信息技术,2004(01):24-26.
- [18] 王文君. 基于自适应遗传算法的无线网络智能选频技术研究[J]. 电信科学,2015, 31(3):62-67.
- [19] 王翠珍,唐金元. 对称 RC 双 T 网络在选频放大电路中的应用[J]. 科技信息,2010(31):494-496.
- [20] 池玉友,许建军,秦占豪. 整流天线技术及应用[J]. 电子信息对抗技术,2007,22(4):28-31.

## Design and Analysis of New RF Energy Harvesting System

Zhang Yu, Xu Shu

(College of Electrical and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** With the development of the electronic micro-system, such as the wireless sensor network, the battery can not meet the needs of long-term power supply, more and more attention have been paid on the electronic micro-system to power by harvesting ambient radio frequency energy. In the view of the low conversion efficiency of present commonly used radio-frequency energy harvesting system, this paper proposes a new type of energy harvesting system, which contains ultra-wideband antenna, matching network, rectifying booster circuit etc. By using the HFSS software to optimize the ultra-wideband antenna, the ultra-wideband antenna are promoted under the wide band; the load value range of the rectifier conversion efficiency is determined by the analysis of rectifier efficiency based on rectifying the booster circuit under different load. The efficiency of the new type of radio frequency energy harvesting system is close to 13.5%, the efficiency of commonly used radio-frequency energy harvesting system is nearly increased by 6%.

**Keywords:** wireless communication; wireless energy transmission; RF energy collection; rectifier efficiency