

基于频率控制的封闭腔体微波无线输能技术

敬小炜, 景建伟, 闫丽萍, 刘长军*

(四川大学电子信息学院, 四川成都 610064)

摘要: 随着航空航天技术的快速发展, 封闭腔体内的无线能量传输(Wireless Power Transmission, WPT)技术开始受到广泛关注. 基于频率控制的WPT技术, 可实现对电大封闭腔体($10^3 \times \lambda^3$)内的多方位传感器进行可控和高效的无线充电. 电大腔体内的电场分布对频率的变化敏感, 利用频率变化实现对封闭腔体场分布控制. 实验结果表明, 在S波段的 1 m^3 腔体最高WPT传输效率为96.6%. 设计的宽带整流电路实测整流效率最高为80%, 整流效率高于50%的带宽为1.65 GHz. 在2.401~2.495 GHz频段实现控制双接收机的不同工作状态, 展现其在航空航天器等封闭空间中为传感器无线供电的应用前景.

关键词: 电大封闭腔体; 频率控制; 高效率; S波段; 微波无线能量传输; 整流电路

基金项目: 国家自然科学基金(No.U22A2015, No.62071316)

中图分类号: TN91; TM724.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)07-2257-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230932

Microwave Wireless Power Transmission Inside a Closed Cavity Based on Novel Frequency Controlling

JING Xiao-wei, JING Jian-wei, YAN Li-ping, LIU Chang-jun*

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract: With the rapid development of aerospace technology, wireless power transmission (WPT) in the closed cavity has attracted extensive attention. WPT based on frequency control is proposed, which can realize controllable, and high-efficiency wireless charging of multi-directional sensors in electrically large closed cavities ($10^3 \times \lambda^3$). The electric field distribution in an electrically large cavity is very sensitive to the change of frequency, and the field distribution in the closed cavity can be controlled by changing frequency. The experimental results show that the highest WPT efficiency at S-band is 96.6%. The measured rectification efficiency of the designed broadband rectifier circuit is up to 80%, and the bandwidth with rectification efficiency higher than 50% is 1.65 GHz. The different working states of dual receivers can be controlled in the frequency band from 2.401~2.495 GHz, which shows its application prospect in wireless power supply for sensors in closed spaces such as aerospace vehicles.

Key words: closed electrically large cavity; frequency control; high efficiency; S-band; microwave wireless power transmission; rectifying circuit

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.U22A2015, No.62071316)

1 引言

随着中国航空气间任务的日益繁重, 为保障航天任务的顺利进行, 多样化传感器大量应用于航天器内部^[1]. 传感器用于测量航天器飞行过程中的温度、压力、振动、空速、热流、过载和形变等指标, 对掌握飞行器运行状态非常重要. 无线传感器网络的应用是航天器减重和增加设计灵活性的重要手段. 普通传感器网

络可以实现数据的无线传输, 但供电仍然依托电缆^[2-4]. 在航天器的设计中, 电缆不仅增添了飞行器重量, 还影响航天器内部设备布局, 增加了航天器设计和总装的难度. 采用微波无线能量传输技术(Wireless Power Transmission, WPT)可有效解决上述问题^[5,6]. 基于无线传感器网络功耗低、数量多但位置分散的特性, 利用微波无线能量传输覆盖范围广的优势, 实现单发射端对多接收端的供电^[7].

由于航天器外壳主要由金属或碳纤维复合材料制成,属于封闭或半封闭的环境,微波的辐射损耗以及泄露值较低,可实现高效率的无线能量传输. 现有封闭空间无线能量传输方法主要有准静态、多模式和机械搅拌等^[8-10]. 其研究主要关注在较低的共振频率下,尺寸为一个波长左右的封闭腔中进行WPT实验. 模式密度受频率影响显著,在较低频率下,模式数量受到一定限制,影响WPT的效率.

本文提出频控WPT技术,实现对电大封闭腔体($10^3 \times \lambda^3$)内的传感器,进行可控和高效率的无线供电. 通过改变工作频率来实现对双传感器4种工作模式的控制.

2 封闭腔体微波无线能量传输系统

2.1 电大封闭腔体的模式分析

以半径 $a=0.5$ m,长 $d=1.25$ m的金属圆柱腔作为电大封闭腔体,如图1所示. 电磁波能量由一端注入后,经过金属腔体反射,由接收端输出. 由于封闭腔内几乎不存在辐射损耗和介质损耗,导体损耗很低,具有很高的品质因数,获得很高的能量传输效率.

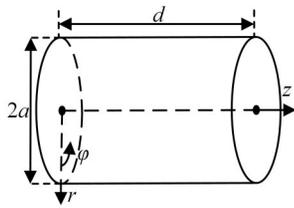


图1 圆柱封闭腔体示意图

圆柱封闭腔体内可以存在两类谐振模式,即 TM_{mnp} 模和 TE_{mnp} 模. 其中 m 、 n 、 p 分别代表该模式在 r 、 ϕ 和 z 方向上分布的半驻波数,对应不同的场的分布. 圆波导谐振腔的谐振频率 f_0 为

$$f_0 = \begin{cases} \frac{1}{2a\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{u'_{mn}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{pa}{d}\right)^2}, & TE_{mnp} \text{ 模} \\ \frac{1}{2a\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{u_{mn}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{pa}{d}\right)^2}, & TM_{mnp} \text{ 模} \end{cases} \quad (1)$$

其中, μ_0 和 ϵ_0 分别为真空中的导磁率和介电常数, u_{mn} 为 m 阶贝塞尔函数导数的第 n 个根. 谐振频率与腔体尺寸密切相关.

以 $TM_{8,1,18}$ 模($f_0 = 2\,455.289$ MHz)为例,分析谐振频率对腔体尺寸的敏感性. 将 f_0 分别对 a 和 d 求导:

$$\frac{df_0}{da} = -\frac{\sqrt{\frac{a^2 p^2}{d^2} + \frac{u_{mn}^2}{\pi^2}}}{2a^2 \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

$$\frac{df_0}{dd} = \frac{ap^2}{2d^3 \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\left(\frac{u_{mn}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{pa}{d}\right)^2}} \quad (3)$$

将 $u_{8,1}=12.225$ 代入式(2)和式(3)得到 df_0/da 和 df_0/dd 分别为 4.9×10^9 Hz/m和 1.5×10^9 Hz/m. 因此,腔体半径 a 和长度 d 每改变1 mm,将分别引起4.9 MHz和1.5 MHz的谐振频率变化. 可见谐振频率 f_0 对于腔体尺寸非常敏感.

根据式(1)计算与 $TM_{8,1,18}$ 模谐振频率相近的模式,分别为 $TM_{8,2,16}$ 、 $TE_{8,5,6}$ 、 $TM_{7,5,5}$ 、 $TM_{4,5,12}$ 、 $TM_{4,7,2}$ 、 $TM_{12,2,14}$ 、 $TE_{3,7,7}$ 、 $TE_{9,3,12}$ 、 $TM_{20,1,3}$ 、 $TM_{16,2,3}$ 、 $TE_{1,2,20}$ 模式. 相邻模式之间频率间隔的平均值为238 kHz. 文献[11]中相邻模式之间的频率间隔近似公式为

$$\Delta f \approx \frac{c^3}{8\pi f^2 V} \quad (4)$$

其中, c 为光速, V 代表腔体的体积. 代入相应值得到在2.455 GHz相邻模式之间的近似频率间隔 Δf 为181 kHz. 两者计算值基本一致,互为佐证. 可见电大腔体内的场分布对频率的变化十分敏感,微小频率变化将改变腔体模式,导致完全不同的电磁场分布.

在CST电磁仿真软件中运用本征模仿真得到封闭圆柱腔体内的场分布. 研究选取了典型的场分布来展示其无线输能的模式特性如图2所示.

(1)模式一($f_0 = 2\,320.5$ MHz):电场分布集中在腔体的截面圆心呈柱状分布,在圆柱壁上分布较少. 在该模式下,接收端在沿圆柱的不同位置,均可以实现高效无线能量传输.

(2)模式二($f_0 = 2\,319.51$ MHz):电场主要分布在远离腔体圆心的侧面,呈紧密排列的球状聚集点. 接收端在封闭腔体侧壁附近,可实现高效无线能量传输.

(3)模式三($f_0 = 2\,319.44$ MHz):能量最集中分布的位置在圆心和外壁之间,接收端置于封闭腔体空间中的合适位置可实现高效无线能量传输.

综上所述,电大封闭腔体内谐振模式数量众多,场分布对于频率变化和腔体尺寸都十分敏感. 不同谐振模式对应不同的场分布变化. 通过控制频率来选择合适模式,实现不同位置间的高效无线输能.

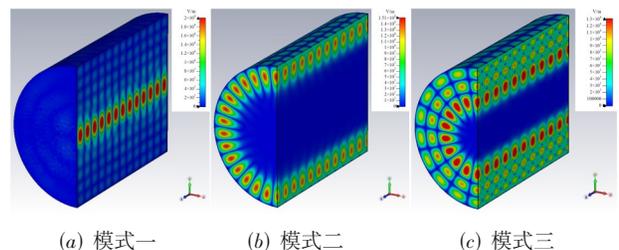


图2 典型电场分布

2.2 WPT 效率计算

在封闭金属圆柱腔内进行无线能量传输,发射端采用 1 个发射单元,接收端采用 N 个接收单元,建模为一个 $(1+N)$ 端口网络^[12]. 设输入端的入射功率波为 a_i , 反射功率波为 b_i , 接收端入射功率波和反射功率波表示为 $\mathbf{a}_o = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$, 和 $\mathbf{b}_o = [b_1, b_2, \dots, b_N]^T$. 根据散射矩阵定义可得:

$$\begin{bmatrix} b_i \\ \mathbf{b}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ii} & \mathbf{S}_{io} \\ \mathbf{S}_{oi} & \mathbf{S}_{oo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ \mathbf{a}_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $(1+N)$ 维散射参数矩阵分为 4 个部分:输入-输入标量 S_{ii} , $1 \times N$ 输出-输入行向量 \mathbf{S}_{io} , $N \times 1$ 输入-输出列向量 \mathbf{S}_{oi} 和 $N \times N$ 输出-输出矩阵 \mathbf{S}_{oo} .

当接收端接匹配负载时,有 $\mathbf{a}_o = \mathbf{0}$, 可得:

$$\mathbf{b}_o = \mathbf{S}_{oi} a_i \quad (6)$$

那么能量传输效率可以由下式计算得到:

$$\eta = \frac{|\mathbf{b}_o|^2}{a_i^2} = \frac{|\mathbf{S}_{oi} a_i|^2}{a_i^2} = \frac{a_i^2 |\mathbf{S}_{oi}|^2}{a_i^2} = |\mathbf{S}_{oi}|^2 \quad (7)$$

3 微波 WPT 系统及实测

3.1 微波 WPT 系统

在封闭腔体中,不存在自由空间的辐射损耗,电磁波遇到金属壁会被反复反射回来,形成驻波. 其电场和磁场的分布是按一定规律形成的,电磁能量被束缚在腔体中. 同一频率下,腔体中的电磁场模式分布是固定的,能量分布较集中为“亮点”,几乎没有能量到达为“暗点”. 不同频率下,激励模式的电磁场分布是不同的. 在频率 f_1 的暗点处,可能是频率 f_2 的亮点. 通过变换不同的输入频率可有效减少无线能量传输“暗点”的存在区域,从而实现在任意位置都能接收到微波能量,提高 WPT 的效率和覆盖面积.

微波 WPT 测试系统如图 3 所示. 矢量网络分析仪型号为 Agilent N5230A. 发射天线和接收天线均为单极子天线,长度为 23 mm. 发射天线放置在圆柱腔发射面的中心位置并通过连接线与矢量网络分析仪的一端口相接. 接收天线放置在圆柱腔接收平面圆心处,通过连接线与矢量网络分析仪的二端口相接,构成二端口网络.

在接收平面的中心点处的实测 $|S_{21}|$ 如图 4 所示, $|S_{21}|$ 表征一端口到二端口的电压传输系数,单位为 dB. 最高 $|S_{21}|$ 和 WPT 效率分别为 -0.3 dB 和 96.6%. 由图 4 看出在 2.3~2.6 GHz 频段内存在许多模式可以实现向接收面中心点的高效无线输能. 为详细展示谐振频率的敏感性,选取了 2 370~2 450 MHz 频率范围 $|S_{21}|$ 高于 -3 dB 的数据展示如图 4 所示. 数据说明,在该频率范围内,存在许多可实现向接收面中心点进行高效无线

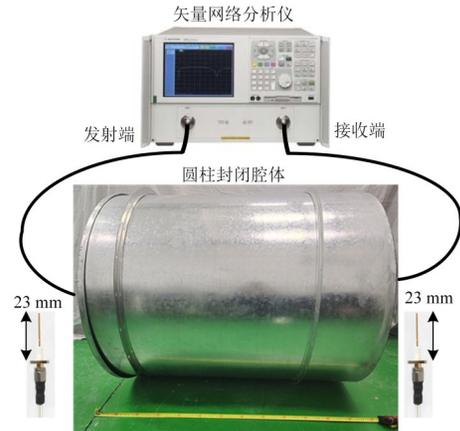


图 3 微波 WPT 测试系统

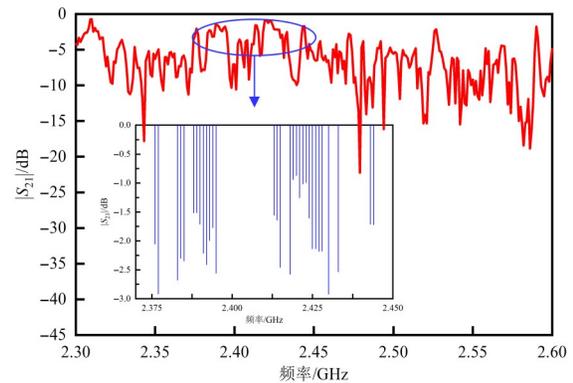


图 4 单发射端单接收端实测 $|S_{21}|$

输能的谐振模式,且相邻模式之间的谐振频率十分接近. 微小的频率变化将造成完全不同的谐振模式,进而影响腔体中的场分布. 实验表明,在封闭腔体内可实现高效率微波无线能量传输,微小的频率变化引起谐振模式改变让封闭腔体内的频控技术具有实验可操作性,即通过控制频率可以实现向腔体中不同位置的目标进行可控又高效的无线输能.

3.2 整流电路

设计并测量了一个宽频带整流电路^[13]以用于将接收天线接收到的微波转化为直流,如图 5 所示. 介质基板选用 F4B 板材,厚度为 1 mm,介电常数为 2.65,损耗角正切为 0.002,表面覆铜厚度为 0.035 mm. L_3 和 L_4 为短路传输线,旨在抵消二极管的容性阻抗,实现虚部匹配. 二极管 D_2 两端并联 0.1 pF 电容器 C_1 用于调谐二极管的实部输入阻抗到 50Ω . 该整流电路的整流效率仿真与实测结果对比如图 6 所示. 整流效率高于 50% 的频率带宽为 1.65 GHz. 在输入功率为 10 dBm 时,可以在 2.35 GHz 处达到最高 80% 的转换效率.

3.3 微波 WPT 系统的直流输出

微波 WPT 直流输出测试系统如图 7 所示. 计算机用于控制信号源 (Hittite HMC-T2220) 发射频段范围为

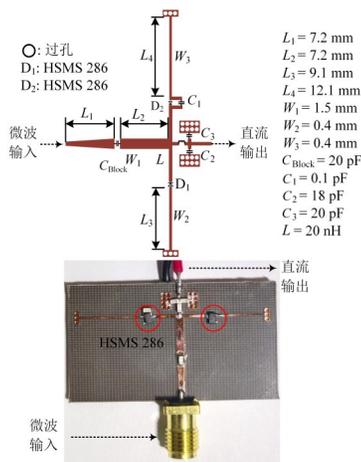


图5 整流电路版图与实物图

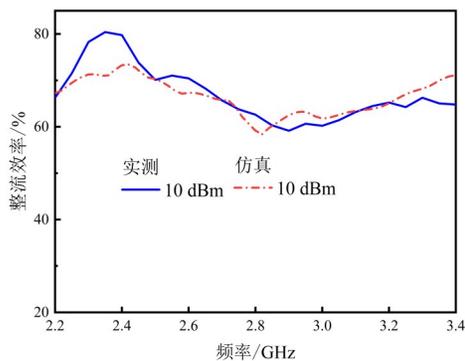


图6 整流电路仿真与实测结果图

2~3 GHz的微波信号.发射天线放置于发射面的中心处,接收天线依次放置于圆柱腔体的另一端接收面.接

收天线与设计的宽频带整流电路相接作为接收器.示波器(泰克DPO-7254)用于记录整流电路的输出电压波形,并根据电压值计算转换效率.微波WPT系统的直流转换效率 η_{MW-DC} 为^[14]

$$\eta_{MW-DC} = \frac{V_{out}^2}{R_{load}} \cdot \frac{1}{P_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

经测量和计算得出在接收平面的中心点处可以达到最高66%直流转换传输效率.

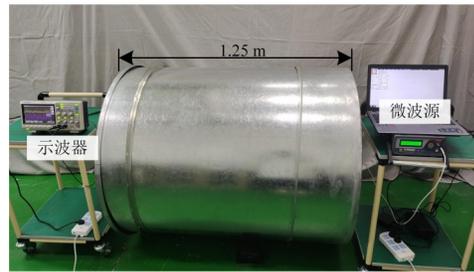


图7 微波WPT直流输出测试系统

4 频控WPT系统设计及实验测量

为演示封闭腔体中的频控系统,在腔体中的不同位置放置了2款相同的整流天线,以它们的转换效率来展示频率控制的实现.输入频率范围设置为2.412~2.484 GHz并将其划分为14个频段,相邻频段之间的间隔为5 MHz.转换效率高于10%的情景定义为高功率水平模式(标记为“1”),转换效率低于10%的情景定义为低功率水平模式(标记为“0”).根据测量得到的14个频段对应的双整流天线转换效率,绘制双整流天线工作模式如表1所示,其中每个频段以其中心频率来表示.

表1 14频段双整流天线工作情况

频段/GHz	整流天线转换效率/%		总效率/%	工作模式	频段/GHz	整流天线转换效率/%		总效率/%	工作模式
	A	B				A	B		
2.412(1)	5	0	5	00	2.447(8)	1	21	22	01
2.417(2)	10	22	32	11	2.452(9)	1	8	9	00
2.422(3)	24	4	28	10	2.457(10)	1	0	1	00
2.427(4)	18	5	23	10	2.462(11)	20	12	32	11
2.432(5)	10	3	13	10	2.467(12)	1	4	5	00
2.437(6)	18	1	19	10	2.472(13)	9	50	59	01
2.442(7)	9	0	9	00	2.484(14)	9	4	5	00

在频段(1)(7)(9)(10)(12)(14),双整流天线都处于低功率水平模式,记为模式“00”.在频段(8)(13),只有整流天线B处于高功率水平模式,记为模式“01”.在频段(3)(4)(5)(6),只有整流天线A处于高功率水平模式,记为模式“10”.在频段(2)(11),双整流天线都处于高功率水平模式,记为模式“11”.测试结果显示,不同频段的双整流天线呈现出4种不同工作状态.因此,根据实际需求,可以通过频率控制来实现对2个接收机4种工作模式的控制.其典型应用场景即为封闭空间中的传感器网络^[15].

5 结论

本文提出基于新型频控技术的无线能量传输系统,实现对电大封闭腔体($10^3 \times \lambda^3$)内的多接收机,进行可控和高效率的无线供电.主要成果如下:

- (1) 实现在电大腔体中无线能量传输的全覆盖,最高传输效率为96.6%.
- (2) 设计S波段宽带高效率整流电路,最高的实测整流效率为80%,效率大于50%的带宽为1.65 GHz.
- (3) 通过频率控制实现对接收机充电状态的独立控制,展现了封闭空间中为设备无线充电的应用前景.

参考文献

- [1] 徐武欣, 吕殿君, 詹景坤. 基于无线传输的运载火箭电气系统方案构想[J]. 电子测试, 2022, 36(13): 82-85.
XU W X, LV D J, ZHAN J K. Based on wireless transfer notion for electrical system of launch vehicle[J]. Electronic Test, 2022, 36(13): 82-85. (in Chinese)
- [2] SONG C Y, LÓPEZ-YELA A, HUANG Y, et al. A novel quartz clock with integrated wireless energy harvesting and sensing functions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4042-4053.
- [3] ALI K, ROGERS D J. An orientation-independent multi-input energy harvesting wireless sensor node[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 1665-1674.
- [4] XIA H K, XIA Y S, YE Y D, et al. Simultaneous wireless strain sensing and energy harvesting from multiple piezopatches for structural health monitoring applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 8235-8243.
- [5] SHINOHARA N. History and innovation of wireless power transfer via microwaves[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(1): 218-228.
- [6] 兰子林, 邹喜华, 白文林, 等. 光载信息能量同传方案及其通信检测应用[J]. 电子学报, 2022, 50(4): 804-810.
LAN Z L, ZOU X H, BAI W L, et al. Information and power over fiber scheme and its applications for communications and detections[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(4): 804-810. (in Chinese)
- [7] 魏振春, 傅宇, 马仲军, 等. 带时间窗的无线可充电传感器网络多目标路径规划算法[J]. 电子学报, 2022, 50(8): 1819-1829.
WEI Z C, FU Y, MA Z J, et al. Multi-objective path planning algorithm for WRSN with time window[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(8): 1819-1829. (in Chinese)
- [8] SASATANI T, CHABALKO M J, KAWAHARA Y, et al. Multimode quasistatic cavity resonators for wireless power transfer[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2746-2749.
- [9] ABDELRAHEEM A, SINANIS M D, PEROULIS D. A new wireless power transmission (WPT) system for powering wireless sensor networks (WSNs) in cavity-based equipment[C]//2019 IEEE 20th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON). Piscataway: IEEE, 2019: 1-5.
- [10] SASATANI T, CHABALKO M, KAWAHARA Y, et al. Geometry-based circuit modeling of quasi-static cavity resonators for wireless power transfer[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 382-390.
- [11] HILL D A. Electromagnetic Fields in Cavities[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [12] 陈臣. 封闭空间内微波无线能量传输方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
CHEN C. Methods of Microwave Wireless Power Transmission in Enclosed Space[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [13] WU P D, HUANG S Y, ZHOU W S, et al. One octave bandwidth rectifier with a frequency selective diode array[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(11): 1008-1010.
- [14] 张彪, 刘长军, 江婉, 等. 一种基于肖特基二极管的大功率微波整流电路[J]. 电子学报, 2013, 41(9): 1854-1857.
ZHANG B, LIU C J, JIANG W, et al. A large power microwave rectifier based on Schottky diodes[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(9): 1854-1857. (in Chinese)
- [15] 张自强, 李平, 文玉梅, 等. 一种上变频自供电无线传感器电源管理电路[J]. 电子学报, 2015, 43(7): 1407-1412.
ZHANG Z Q, LI P, WEN Y M, et al. A frequency up-conversion self-powered power management circuit for wireless sensors[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(7): 1407-1412. (in Chinese)

作者简介



敬小炜 女, 2000年12月出生. 四川大学电子信息学院硕士. 主要研究方向为微波无线输能.
E-mail: jing_xiaowei@stu.scu.edu.cn



景建伟 男, 1996年1月出生. 四川大学博士. 主要研究方向为微波无线能量传输.
E-mail: 2019222050008@stu.scu.edu.cn



闫丽萍 女, 1972年3月出生. 四川大学教授. 主要研究方向为微波技术方向. 中国电子学会会员编号: E190001519S.
E-mail: liping_yan@scu.edu.cn



刘长军 男, 1973年4月出生. 四川大学教授. 主要研究方向为微波技术方向.
E-mail: cjliu@scu.edu.cn