微波无线功率传输中高效率双线 极化整流天线设计[®]

张 浩1,高思平3,刘穗彬2,3,阴 玥1,郭永新3*

(1.西北工业大学微电子学院,西安 710071;2.西安电子科技大学电子工程学院,西安 710071;3.新加坡国立大学电气与计算机工程系,新加坡 119260)

摘 要:本文提出一种适用于微波无线功率传输中高效率双线极化整流天线设计。通过双线极化天线、微带正 交耦合器以及整流器集成一体化,线极化入射电磁波将按照极化偏转角分解为水平极化以及垂直极化分量,经由微 带正交耦合器完成非均衡至均衡功率再分配机制,满足高效率微波至直流整流器输入功率需求。理论分析与实验 结果均验证所提出的双线极化整流天线在任意极化偏转角下仍能保持高效率稳定直流电压输出,满足高性能微波 无线功率传输应用需求。

关键词:双线极化整流天线;线极化入射电磁波;微带正交耦合器;微波无线功率传输技术 中图分类号:TN99 文献标识码:A 文章编号:1674-7135(2020)02-0064-06 D O I:10.3969/j.issn.1674-7135.2020.02.011

A High-Efficiency Dual-Linearly-Polarized Rectenna Design for Microwave Wireless Power Transmission

ZHANG Hao¹, GAO Siping³, LIU Suibing^{2,3}, YIN Yue¹, GUO Yongxin^{3*}

(1. School of Microelectronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710071, China;

2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, 119260, Singapore)

Abstract: This paper presents a high-efficiency dual-linearly-polarized (DLP) rectenna design for microwave wireless power transmission (MWPT). With an integration of a DLP antenna, a microstrip hybrid coupler and two sub-rectifiers, the linearly-polarized electromagnetic wave can be decomposed by polarization tilt angles into horizontally-polarized (HP) and vertically-polarized (VP) components, resepectively. Then, the microstrip hybrid coupler redistributes such uneven HP and VP voltages evenly as incidences for two high-efficiency sub-rectifiers. Both theoretical and experimental results validate that the presented DLP rectenna maintains high-efficiency and stable output voltages regardless of polarization tilt angles, which brings a prospect for high-performance MWPT applications.

Key words: Dual-linearly-polarized rectenna; Linearly-polarized electromagnetic wave; Microstrip hybrid coupler; Microwave wireless power transmission

0 引言微波无线功率传输技术有效保障无线传感网

络^[1-3]稳定、高效运行。整流天线(由整流器集成 天线构成)作为微波无线功率传输系统关键电路,

① 收稿日期:2020-03-21。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号:2019015001) 作者简介:张浩(1990—),博士/副教授,研究方向电磁场与微波技术。E-mail:zhang. hao@ nwpu. edu. cn 通信作者:郭永新(1971—),博士/教授,研究方向电磁场与微波技术。E-mail:eleguoyx@ nus. edu. sg

接收入射电磁波并整流输出直流电压,满足无线传 感网络中传感器以及中央处理器等元器件功耗需 求。通常情况下,整流天线采用具有高辐射增益天 线接收线极化入射电磁波,建立高效率微波无线功 率传输链路^[4-6]。然而,发射/接收天线间易发生 极化错位,如图1所示,当极化偏转角度(*φ*)逐渐 增大时,越来越多入射电磁波因极化错位而损失在 自由空间中。圆极化整流天线在一定程度上可解 决发射/接收天线间极化错位问题。然而,以牺牲 50%入射电磁波功率作为代价,不利于高效率微波 无线功率传输系统实现。整流器微波至直流整流 过程中非线性谐波(互调)产物^[7,8]有效辅助天线 辐射/极化方向对准。然而,附加感知以及控制电 路将增加微波无线功率传输系统复杂度,不利于紧 凑、小型化电路实现。



Fig. 1 Illustration of polarization misalignment between TX/RX antennas

双线极化整流天线^[9]在一定程度上解决了发 射/接收天线间极化错位问题(图 2a 所示),其垂直 (Vertically-Polarized, VP)、水平(Horizontally-Polarized, HP)极化端口分别连接相同电路结构整流器 A、B,实现入射电磁波全功率接收以及高效率微波 至直流整流。然而,入射电磁波按照发射/接收天线 间极化偏转角在 VP、HP 端口功率分配(PVP、PHP) 难以均衡,如公式(1)所示。

$$\alpha = \frac{P_{\rm HP}}{P_{\rm VP}} = \tan^2 \varphi \tag{1}$$

其中,入射线极化电磁波极化方向与双线极化 垂直极化方向夹角为极化偏转角度(φ)。不难看 出,当极化偏转角 $\varphi \neq 45^{\circ}$ 或135°时,导致双线极化 天线非均衡功率分配(P_{VP} 、 P_{HP}),因此难以保证整流 器 A、B 高效率微波至直流整流以及最大效率直流 功率整合^[10]。

如图2(b)所示,双线极化天线和整流器A、B间 连接微带正交耦合器,在双线极化天线端口处(P₁、 P₄)非均衡入射电磁波接收功率将被微带正交耦合 器重新分配,实现非均衡至均衡功率分配机制^[11], 从而保证图2(b)中整流天线A、B任意极化偏转角 度下稳定、高效微波至直流整流以及最大效率直流 功率整合。为进一步满足整流天线紧凑、小型化电 路设计需求,本文基于图2(b)改进型双线极化整流 天线,采用空气介质加载技术实现紧凑、高增益双线 极化天线。理论分析与实验结果均验证高效率双线 极化整流天线设计,适用于高效率微波无线功率传 输应用中。



Fig. 2 Common dual-linearly-polarized rectennas

1 工作机制与原理性分析

为实现本文所提出的高效率双线极化整流天 线,需着重设计高增益双线极化天线以及高效率整 流器,并集成微带正交耦合器完成整流天线一体化 的目的。本章节具体细化为三部分:1)高增益双 线极化天线设计;2)非均衡至均衡功率分配机制分 析;3)高效率整流器以及整流天线一体化设计。

1.1 高增益双线极化天线设计

图 3 所示为高增益双线极化天线版图结构示意

图,由两层印刷电路板组合设计而成,印刷电路板选 用厚度 20mil 罗杰斯 RO4350B 介质板材(介电常数 为ε_r=3.66,损切角 tanδ=0.0031)。双线极化天线 馈电网络位于第二层印刷电路板背面,而接地金属 板位于空气层与第二层印刷电路板之间。接地金属 板引人对称双"H"型缝隙,激励第一层印刷电路板 上层正方形金属贴片,实现高增益双线极化谐振辐 射,详细高增益双线极化天线设计参数如表1所示。





表1 详细高增益双线极化天线设计参数

1	Table 1 Detailed Parameters of High-Gain D					
Antenna Design mi						
$L_{\rm s}$	$L_{ m P}$	\$	t	$S_{1_}l$	$S_{1_}w$	$S_{2_}l$
70	47.2	4	0.508	8	2.2	10

w

1.1

d

13

 θ

45°

 L_3

11.46

 $S_2 w$

0.2

 L_1

23

 L_2

12.1

双线极化天线端口回波损耗、耦合系数以及辐射增益如图 4 所示。HP、VP 端口在 2.38 GHz ~2.52 GHz 以及 2.38 ~2.5 GHz 范围的反射系数 均小于-10dB,2.38 GHz ~2.52 GHz 频率范围内,双端口隔离度大于 20dB。同时,HP、VP 端口最大辐射增益均大于 8dBi,HP、VP 端口间增益差异较小,可忽略不计,有助于均衡接收线极化入射电磁波。













双线极化天线端口处电压可以表示为

 $V_{\rm HP} = \sqrt{2} V_{\rm S} \sin\varphi \cos\omega t \tag{2}$

 $V_{\rm VP} = \sqrt{2} V_{\rm s} \cos\varphi \cos\omega t \tag{3}$

其中, V_s 是假设双线极化天线接收到总功率 P_r = V_s^2/Z_0 所对应电压平均值, Z_0 是对应端口阻抗, 一般为 50 欧姆。不难发现,随着极化偏转角(φ)变 化,公式(2)、(3) 中端口电压非均衡电压难以保证 图 2a 中整流器 A、B 高效率微波至直流整流以及直 流功率整合。图 2b 中微带正交混合网络散射参数 矩阵可以表示为

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{i}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0\\ -\frac{i}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}}\\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & -\frac{i}{\sqrt{2}}\\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{i}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix}$$

公式(2)、(3)中双线极化天线端口非均衡电压 通过微带正交混耦合器重新分配,并传输至混合网 络直通、耦合端口,相应端口处电压可以表示为

$$V_{\rm dir} = -\frac{(iV_{\rm HP} + V_{\rm VP})}{\sqrt{2}} = -V_{\rm S}(i\sin\varphi + \cos\varphi)\cos\omega t$$
(5)

$$V_{\rm cou} = -\frac{(iV_{\rm VP} + V_{\rm HP})}{\sqrt{2}} = -V_{\rm S}(i\cos\varphi + \sin\varphi)\cos\omega t$$
(6)

不难看出,无论极化偏转角(φ)如何变化,直 通、耦合端口处电压幅值保持不变。因此,端口2、3 处整流器A、B在任意极化偏转角下,仍保持高效率 微波至直流整流以及直流功率整合。

1.3 高效率整流器以及整流天线一体化设计

为满足小型化整流器电路设计需求,文章采用 集总参数元件进行匹配并在 ADS 谐波平衡仿真软 件中进行优化设计,如图 6 所示。其中,输入匹配电 路中电感(*L*_m)与电容(*C*_m)结合 50 欧姆传输线(厚 度 20mil 罗杰斯 RO4350B 介质板材)进行共优化, 有助于实现与图 4 所高增益双线极化天线一体化设 计。图 6(a)所示为集总参数元件设计的整流器原 理图及其版图,为满足高效率微波至直流功率整流, 选择具有低开启电压肖特基二极管 HSMS2860。同 时,优化获得匹配电路中电容 $C_m = 1 pF$ 以及电 $\overline{M}L_m = 2.2 nH$ 满足整流器最佳功率匹配需求,低通 滤波器中电容 $C_L = 22 uF$ 以及负载电阻 $R_L = 980 \Omega$ 以 满足最大直流功率输出。通过测量不同输入功率下 负载 RL 两端输出电压 V_o ,可通过如下公式计算得 到整流器微波至直流整流效率。

$$\eta = \frac{V_o^2}{R_{\rm L}} \times \frac{1}{P_{\rm in}} \times 100\% \tag{7}$$

整流器微波至直流整流效率以及输出电压仿真 与测试结果如图 6(b) 所示, 仿真与测试结果具有很 好一致性。在 2~12dBm 输入功率范围内, 整流器 可获得大于 50% 整流效率, 有助于高效率微波无线 功率传输系统。集成常见正交耦合器, 即可实现高 效率整流天线一体化设计。



2 系统测试与实验验证

为验证本文所提出的高效率双线极化整流天线 设计,实验设备搭建如图 7(a)所示。信号发生器 AV1441A 输出 20dBm 功率激励双线极化天线垂直 极化端口。双线极化整流天线距离发射天线距离为 *d*,在实验过程中为了验证不同距离作用下所提出双 线极化整流天线有效性,分别选择距离 *d*=30,40, 50,60cm,改变双线极化整流天线极化偏转角 *φ* 从 0度至90度,角度步长为15度,并测试相应输出电 压值。在不同距离作用下,双线极化整流天线输出 电压测试结果如图7(b)所示。不难发现,在任意天 线极化偏转角度下,双线极化整流天线均可输出稳 定直流电压(微弱波纹可能来自于双线极化方向非 均衡天线增益),从而验证了本文所提出的双线极 化整流天线非极化敏感特性,适用于高效率微波无 线功率传输中。



图 7 实验设备搭建以及不同距离下计划偏转角测试结果

Fig. 7 Measurement setup and measured output voltages under different distances and polarization tilt angles

3 结论

本文提出一种应用于微波无线功率传输中高效 率双线极化整流天线设计。通过双线极化天线、微 带正交耦合器以及整流器集成一体化,线极化入射 电磁波按照极化偏转角度分解为水平极化与垂直极 化分量,经由正交耦合器完成非均衡至均衡功率再 分配机制,以满足高效率微波至直流整流器均衡输 入功率需求。理论分析与实验结果均验证所提出紧 凑高效双线极化整流器在不同距离以及意极化偏转 角度下仍保持高效率微波至直流整流,适用于高效 率微波无线功率传输中。

参考文献:

- [1] H Zhang, Y Guo, Z Zhong, W Wu. Cooperative Integration of RF Energy Harvesting and Dedicated WPT for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 29, no. 4, pp. 291-293, April 2019.
- [2] A N Parks, A P Sample, Y Zhao, J R Smith. A wireless sensing platform utilizing ambient RF energy [J]. IEEE Topical Conference on Biomedical Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems, Austin, TX, 2013, pp. 154-156.
- [3] T Lin, J Bito, J G D Hester, J Kimionis, R A Bahr, M M Tentzeris. On-Body Long-Range Wireless Backscattering Sensing System Using Inkjet-/3-D-Printed Flexible Ambient RF Energy Harvesters Capable of Simultaneous DC and Harmonics Generation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 65, no. 12, pp. 5389-5400, Dec. 2017.
- [4] H Zhang, S Gao, T Ngo, W Wu, Y Guo. Wireless Power Transfer Antenna Alignment Using Intermodulation for Two-Tone Powered Implantable Medical Devices [J].

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, no. 5, pp. 1708-1716, May 2019.

- [5] H Sun, Y Guo, M He, Z Zhong. A Dual-Band Rectenna Using Broadband Yagi Antenna Array for Ambient RF Power Harvesting [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 12, pp. 918-921, 2013.
- [6] Y Hu, S Sun, H Xu, H. Sun. Grid-Array Rectenna With Wide Angle Coverage for Effectively Harvesting RF Energy of Low Power Density [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, no. 1, pp. 402-413, Jan. 2019.
- [7] H Zhang, Y Guo, S Gao, W. Wu. Wireless Power Transfer Antenna Alignment Using Third Harmonic [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 28, no. 6, pp. 536-538, June 2018.
- [8] H Zhang, Y Guo, S Gao, Z Zhong, W Wu. Exploiting Third Harmonic of Differential Charge Pump for Wireless Power Transfer Antenna Alignment [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 29, no. 1, pp. 71-73, Jan. 2019.
- [9] H Sun, W. Geyi. A New Rectenna With All-Polarization-Receiving Capability for Wireless Power Transmission [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 814-817, 2016.
- [10] A N Parks, J R Smith. Sifting through the airwaves : Efficient and scalable multiband RF harvesting [C] // IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID), Orlando, FL, 2014, pp. 74-81.
- [11] H Zhang, S Gao, W Wu, Y Guo. Uneven-to-Even Power Distribution for Maintaining High Efficiency of Dual-Linearly Polarized Rectenna [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 28, no. 12, pp. 1119-1121, Dec. 2018.