

低功率密度下具有通信功能的整流天线

江超 杨雪霞 龚波 王业清

(上海大学通信与信息工程学院, 上海, 200072)

摘要: 本文设计了一种在低功率密度条件下具有通信功能的整流天线。采用双端口馈电的双极化微带天线, 其中垂直极化端口用于整流, 水平极化端口用于通信, 分别工作于 5.8GHz 和 6.1GHz。通过等效电路分析及软件仿真, 整流电路在 10mW 接收功率下获得了 65% 的实测整流效率。将接收天线和整流电路组合测试, 在 2 mW/cm^2 功率密度下获得 62.5% 的实测整流效率。该整流天线可运用在需要通信功能的低功耗电子器件供能中。

关键词: 整流天线, 低功率密度, 双极化

Rectenna with Communication Function in Low Power Density

Jiang Chao, Yang Xue-xia, Gong Bo, Wang Ye-qing

(School of Communications and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract: A rectenna with communication function in low power density is presented in this paper. A dual-polarized microstrip antenna is fed by two ports, including communication port and rectifying port whose operating frequencies are 6.1GHz with horizontal polarization and 5.8GHz with vertical polarization, respectively. After equivalent circuit analysis and software simulation, the rectifying circuit obtains 65% RF-DC efficiency under 10mW input power. The measurement result of rectenna shows that 62.5% conversion efficiency is realized under 2 mW/cm^2 power density. This rectenna can be applied in low power electronic appliances to meet communication demand.

Keywords: rectenna; low power density; dual polarization

1 引言

整流天线是无线输能系统中的核心器件, 拥有通信功能的整流天线更具实用性。文献[1]提出了一种工作在 WLAN 频段的整流天线, 满足传感器通信的同时利用无线输能给电池充电。文献[2]采用整流天线和回溯天线一体化设计, 在实现整流功能的同时还将跟踪信号返回到发射端。另外, 实现通信和整流的复用还可利用双端口双极化天线[3]。

整流天线可能存在高次谐波的重辐射而导致效

率的下降, 因此需要进行谐波抑制 [4]-[8], 文献[4][5]把带通滤波器嵌入接收天线的后端来抑制谐波, 但整体结构的尺寸往往较大。文献[6]利用了天线馈线上附加扇形枝节来抑制谐波, 文献[7]采用馈线上的缺陷地结构对天线的高次谐波进行抑制。从本质上说, 这类天线都不能称为谐波抑制天线, 而文献[8]提出的口径耦合天线在无外加滤波器就可以实现 2-3 次谐波的抑制。

本文提出了一种具有通信功能的整流天线, 它包含了双端口双极化的微带天线以及工作在低功率密度下的整流电路。接收天线双端口具有较高隔离度, 减少了端口之间的相互影响。根据 IEEE 标准定义 5.8GHz 长时间暴露功率密度不超过 3.87 mW/cm^2 [9], 该整流天线工作在 2 mW/cm^2 的功

基金项目: 上海市重点学科和特种光纤与光接入网省部共建重点实验室项目 (S30108, 08DZ2231100)

率密度下，具有相对较高的安全性，为无线设备提供直流电能和通信功能。

2 整流天线的设计

整流天线由接收天线和整流电路组成，为了独立评价两者的性能，因此将天线和电路单独设计并测试，然后组合测试整流天线的性能。

2.1 双极化接收天线

为了使接收天线同时具有通信和整流功能，并且满足两者的干扰尽可能地小，采用了双端口馈电的双极化天线。如图 1 所示，天线由双层介质板构成，上层是方形贴片，介质板的中间是两个相互垂直的“工”字型耦合口径，底层是两条馈线，其中端口 1 是工作在 6.1GHz 的通信端口，端口 2 是工作在 5.8GHz 的输能端口。两个端口在工作时分别辐射的是水平极化波和垂直极化波。该天线具有极化隔离的特性，因此最大程度减少了两端口之间相互串扰的影响。

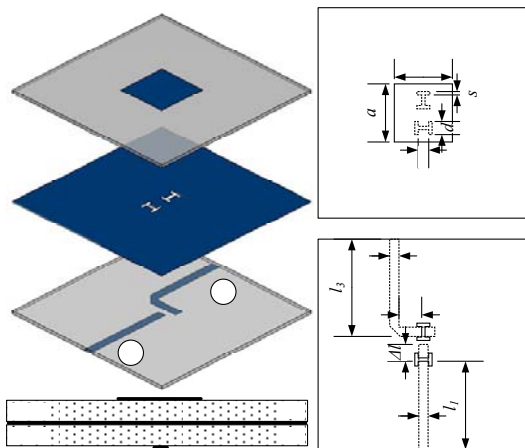


图 1 天线结构图

天线结构参数如表 1 所示，辐射方形贴片边长 a 决定了天线工作频率；缝隙口径面积的大小决定耦合的强弱，同时也影响了工作频率，且面积越小，耦合越强，频率越高；馈线的宽度 w 为 50Ω 特性阻抗，以满足和后端整流电路端口匹配；馈线 l_1 、 l_2 、 l_3 的长度对天线匹配没有影响，而 Δl 的长短可以调节天线输入阻抗的大小，是调节匹配的重要参数。

表 1 天线尺寸（单位：mm）

a	s	d	h	g
13.8	0.8	3.1	0.8	2.5
w	l_1	l_2	l_3	ϵ_r
2.2	20	8.5	18.1	2.55

天线端口的回波损耗和隔离度如图 2 所示，测试和仿真数据相对吻合。从测试数据看，端口 1 工作在 6.1GHz，回波损耗为 -20dB；端口 2 工作在 5.8GHz，回波损耗为 -40dB；两端口的隔离度在整个工作频带内小于 -25dB。图 3 是天线辐射方向图中主极化和交叉极化仿真数据，图 3 (a) 是端口 1 馈电时的方向图，主极化增益为 7.5dB，交叉极化小于 -30dB；图 3 (b) 是端口 2 馈电时的方向图，主极化增益为 7.2dB，交叉极化小于 -25dB。由此可见，这种天线结构具有较高的极化隔离度。

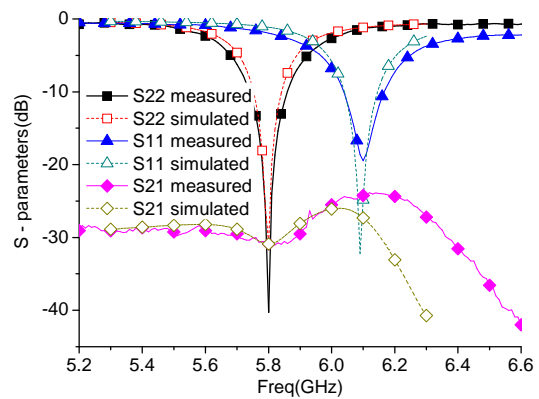
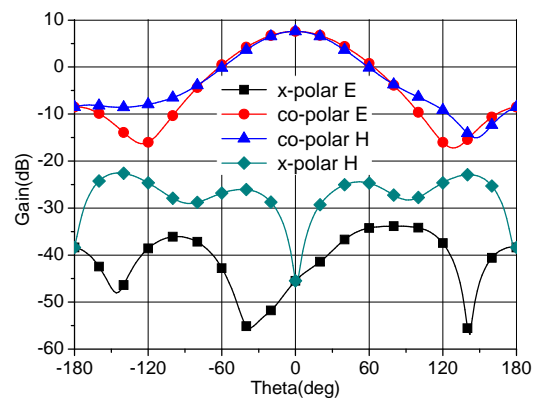


图 2 天线的 S 参数测试与仿真



(a) 水平极化及其交叉极化

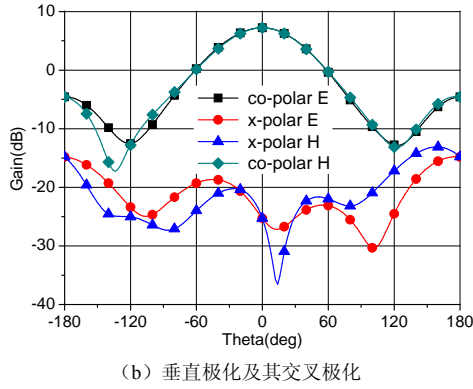


图 3 仿真辐射方向图的极化对比

2.2 整流电路

整流电路的等效电路如图 4 (a) 所示, 包括信号源、电容、电感、二极管和负载。其中 C_1 是隔直电容; L 是高频电感, 它允许直流流通而阻隔高频信号的回流; 二极管是整流电路的核心器件, 由于其非线性效应, 流过二极管的高频信号将产生直流分量; C_2 是滤波电容, 它一方面阻隔了二极管产生的直流分量的回流, 另一方面过滤了高频分量; 最后负载上就获得了直流能量。

微波整流电路采用的是微带传输线结构, 如图 4 (b) 所示, 由输入匹配电路、二极管、输出匹配和滤波器组成。前端输入匹配枝节使得电路在工作频率下获得较好的 S_{11} 性能; 采用 $\lambda_g/4$ 短路枝节线来实现等效电感; 肖特基整流二极管跨接在两端微带线上, 其负极和输入匹配中的短路枝节相连, 也就实现了直流接地; 二极管正极与相当于 C_2 的开路扇形带阻滤波器相连。因此, 在工作状态下, 后端微带线与地板之间就存在着二极管产生的压差, 即可给外设的负载提供直流能量。

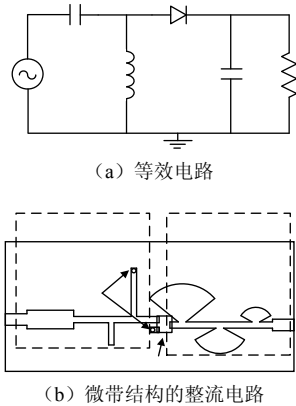


图 4 整流电路及等效电路

整流电路的测试结果如图 5 所示, eff 和 V_{dc} 分别表示整流效率和输出电压。整流效率的计算根据公式 (1), 即为负载上获得的直流能量与接收功率之比。

$$eff = \frac{P_{dc}}{P_{in}} = \frac{V_{dc}^2}{R_L P_{in}} \quad (1)$$

图 5 (a) 是效率、电压随负载变化曲线, 当输入功率为 10mW, 工作频率为 5.78GHz 时, 900Ω 负载两端获得 2.42V 直流电压, 达到 65% 的效率; 图 5 (b) 是效率、电压随输入功率变化曲线, 当工作频率为 5.78GHz, 负载为 900Ω 时, 在 25mW 的输入功率下可以获得接近 4V 的直流电压, 此时达到最高为 69% 的整流效率。由于二极管的结电阻对输入功率变化较敏感, 若此时继续增大输入功率, 电路的输入阻抗将失配, 导致效率迅速下降。

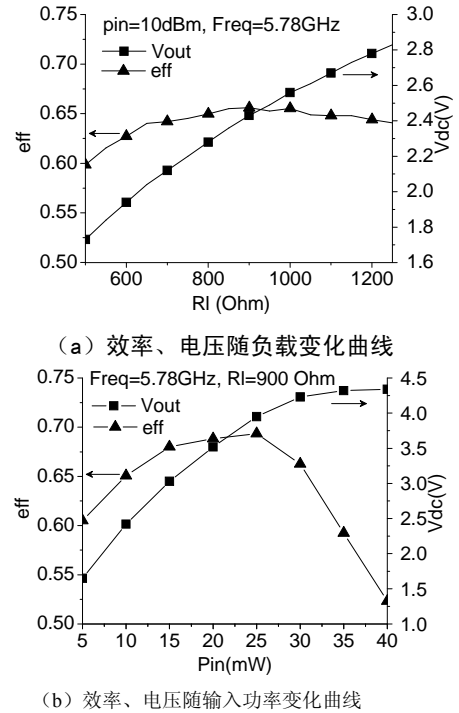


图 5 整流电路测试结构图

3 整流天线的实验

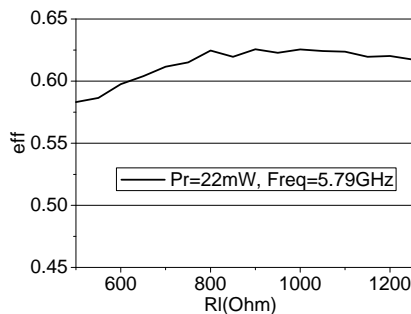
计算整流天线的接收功率可根据 Friis 传输方程:

$$P_r = S_i A_e = \left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right)^2 P_t G_t G_r L_m \quad (2)$$

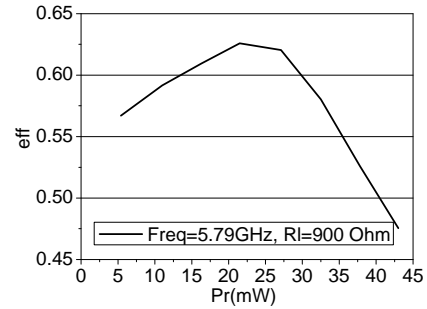
其中 P_t 、 G_t 、 G_r 、 L_m 、 D 分别表示发射功率、发射天线增益、接收天线增益、极化损耗及传输距离。 λ 对应 5.8GHz 时自由空间的波长。

在输能端口工作时，天线增益为 7.2dBi，即在工作频率下的有效面积为 11.17cm^2 ，若此时天线所处 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 的电磁环境中，则天线将接收到 11.17mW 的能量作为输入功率。但这部分能量是否全部进入整流电路取决于电路的匹配和损耗程度。

由于接收的天线的加入，整流效率最高所对应的频率点从原来的 5.78GHz 变化到 5.79GHz，更加接近天线的最佳回波损耗频点。整流天线测试结果如图 6 (a) 所示，效率随负载的变化趋势与整流电路的测试结果吻合，且最佳负载点依然保持在 900Ω 。图 6 (b) 是效率随输入功率变化曲线。当接收功率为 22mW 时达到了 62.5% 的最高整流效率，输入功率的变化趋势同样吻合整流电路的测试情况。整流天线在 $2\text{mW}/\text{cm}^2$ 的低功率密度电磁环境中达到最佳转换效率。



(a) 效率随负载变化



(b) 效率随接收功率变化

图 6 整流天线测试结果

4 结论

本文设计了一种具有通信功能的整流天线，利用双端口馈电的双极化微带天线实现较高的端口隔离度，整流频率和通信频率分别工作在 5.8GHz 和 6.1GHz。在频率为 5.79GHz， $2\text{mW}/\text{cm}^2$ 的低功率密度下，可获得 62.5% 的整流效率。该整流天线可工作在较安全的低功率密度电磁环境中，同时还易于组阵。

参考文献

- [1] Ali M., Yang G., Dougal R., "A new circularly polarized rectenna for wireless power transmission and data communication," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.4, pp. 205- 208, 2005.
- [2] Yu-Jiun Ren, Kai Chang, "New 5.8-GHz circularly polarized retrodirective rectenna arrays for wireless power transmission," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol.54, no.7, pp. 2970- 2976, July 2006.
- [3] Hienonen S., Lehto A., Raisanen A.V., "Simple broadband dual-polarized aperture-coupled microstrip antenna," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symp.*, vol.2, pp.1228-1231, Aug 1999.
- [4] Strassner B., Kai Chang, "Highly efficient C-band circularly polarized rectifying antenna array for wireless microwave power transmission," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.51, no.6, pp. 1347- 1356, June 2003.
- [5] Chin C.-H.K., Quan Xue, Chi Hou Chan, "Design of a 5.8-GHz rectenna incorporating a new patch antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.4, pp. 175- 178, 2005.
- [6] Tzong-Chee Yo, Chien-Ming Lee, Chen-Ming Hsu, Ching-Hsing Luo, "Compact Circularly Polarized Rectenna With Unbalanced Circular Slots," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.56, no.3, pp.882-886, March 2008.
- [7] Yan-Yan Gao, Xue-Xia Yang, Chao Jiang, Jian-Yong Zhou, "A Circularly Polarized Rectenna with Low Profile for Wireless Power Transmission," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 13, page 41-49. 2010.
- [8] Yang, X.-X., J.-S. Xu, D.-M. Xu, and C.-L. Xu, "X-band circularly polarized rectennas for microwave power transmission applications," *Journal of Electronics*, Vol. 25, No. 3, pp.389-393, 2008.
- [9] IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, "IEEE Std C95.1-2005 (Revision of IEEE Std C95.1-1991)," pp.20-30, 2006.

新型平面树状分形天线小型化研究

曾宪峰 张 厚 徐海洋 程智峰

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

zengxianfeng521@163.com

摘要: 根据仿生结构提出了一种新型平面树状分形天线。仿真和测试结果表明: 天线具有比 Manderlbort 分形天线更好的小型化特性。2 阶分形天线与单极子天线相比, 其谐振频率下降了 17.1%。当分支线角度与被加载线段之间夹角符合黄金分割率时, 其小型化程度最高, 为小型化天线的研究提供了新的思路。

关键词: 树状分形, 小型化, 分形天线

Research on a Novel Tree-shaped Fractal Compact Planar Antenna

ZENG Xian-feng, ZHANG Hou, XU Haiyang, CHENG Zhifeng

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan Shannxi 713800)

Abstract: Based on bionics structure, a novel tree-shaped fractal planar antenna is proposed. The simulated and measured results show that the extent of size-reducing of the antenna is better than the Manderlbort tree-shaped fractal antenna. The resonant frequency of the new two iterative fractal antenna is 17.1% lower the monopole antenna. When the angle between the embranchment and the loaded branch is fit for the golden section, the extent of size-reducing of the antenna is the best. This antenna can be widely used in compact structure antenna design.

Keywords: tree-shaped fractal; miniature; fractal antenna

1 引言

自法国数学家 B.Mandelbrot 于 1975 年提出“分形”这一概念以来, 分形电动力学就以一门新的学科得到了广泛的发展。分形天线正是分形电动力学的具体应用之一^[1]。

近年来, 作为分形天线的一个重要组成部分, 树状分形天线的研究受到了越来越多的关注。C.Puente 提出的分形树天线由于其尽量模拟树的形状而不易推广^[2]; J.P.Gianvittorio 和 D.H.Werner 等提出了一种更简单的树形天线, 做到了增加带宽和尺寸缩减^{[3][4][5]}; 文献[6]研究了树状分形天线的多频特性; 文献[7]、[8]研究了 Fibonacci 分形树天线的尺寸缩减特性; 文献[9]研究了树状分形天线的超宽带特性; 文献[10]通过对树状天线进行顶端加载实现了小型化; 文献[11]研究了单极子树状分形天

线的多频与尺寸缩减特性。

树叶作为自然界中树的重要组成部分, 也具有典型的分形结构。将叶状结构抽象设计即可得到本章所研究的新颖树状分形天线。本章首先介绍了新型树状分形天线的几何生成过程, 仿真结果表明, 新型天线具有良好的小型化特性, 2 阶分形天线与普通单极子天线相比, 其谐振频率下降了 17.1%。当分支线角度与被加载线段夹角符合黄金分割率时, 其小型化程度最高。对上述天线进行了实物加工与测量, 实验结果与仿真结果吻合良好。

2 天线的几何描述及设计

2.1 天线的几何描述

本文提出的新型叶脉状分形天线的结构如图 1 所示, 其迭代过程为: 将长度为 1 的单极子天线