

基片集成波导背腔式缝隙天线设计

庞维建¹, 童创明^{1,2}, 张亮³

(1.空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051;2.毫米波国家重点实验室,江苏南京,210096;
3.94907 部队,江西南昌,330000)

摘要 利用谐振腔形成对称场激励,设计实现了一种基于多层基片集成波导技术的背腔式缝隙天线,并对其辐射特性进行了仿真研究。该天线利用双层基片集成波导实现了天线的馈电电路和背腔结构,利用工作于谐振状态的基片集成波导谐振腔对缝隙进行激励,同时通过加载缝隙圆环,显著降低了天线的回波损耗,并具有剖面低、重量轻、易集成的优点。研究了缝隙圆环对天线辐射性能的改善作用,制成了测试样片,天线-10 dB 回波损耗的带宽为 150 MHz,最高增益为 8 dB,交叉极化增益的最高为-12 dB,测量结果与仿真分析吻合较好,验证了设计方法的有效性。

关键词 多层基片集成波导;缝隙天线;背腔式;回波损耗

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.02.011

中图分类号 TN823⁺.24 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)02-0045-04

A Design of Cavity Backed Slot Antenna Based on Substrate Integrated Waveguide

PANG Wei-jian¹, TONG Chuang-ming^{1,2}, ZHANG liang³

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. State Key Lab. of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China; 3. Unit 94907, Nanchang 330000, China)

Abstract: A novel cavity backed slot antenna based on multi-layer substrate integrated waveguide is designed and manufactured by utilizing the resonant cavity to form symmetrical field excitation, and its radiation characteristic is studied and simulated. The proposed antenna using double-layer SIW to realize its feeding circuit and cavity structure has the advantage of low profile, light weight and convenient integration. The promoting effect of ring-slot structure on the radiation performance is considered. Finally, the test structure with a bandwidth of -10 dB return loss at 150 MHz is manufactured. And the maximum gain is 8 dB, and the maximum cross-polarized radiation is -12 dB. The good agreement between the measured results and the simulated results demonstrates that the design method is effective.

Key words: multi-layer substrate integrated waveguide(MSIW); slot antenna; cavity backed; return loss

基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)是近几年工程应用研究较多的导波结构,相对于传统金属波导,它可以用印刷电路板技术方便地进行加工,具有成本低、易集成、重量轻等优点^[1]。

利用基片集成波导技术实现的 SIW 缝隙天线克服了传统金属波导缝隙天线体积大、设计成本高和结构复杂的缺点,可以与微波电路一同集成在一块介质板上,并可以利用金属蚀刻技术方便地加工^[2]。

收稿日期:2013-04-11

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2011JM8025);毫米波国家重点实验室基金资助项目(K201201)

作者简介:庞维建(1986-),男,山东夏津人,硕士生,主要从事电磁波传输研究. E-mail: pangweijian2013@163.com

引用格式: 庞维建,童创明,张亮,等. 基片集成波导背腔式缝隙天线的设计[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):45-48. PANG Weijian, TONG Chuangming, ZHANG liang. A design of cavity backed slot antenna based on substrate integrated waveguide[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(2): 45-48.

近几年来,基于基片集成波导技术的缝隙天线受到国内外学者的关注,已发表多篇论文。Yuan-dan Dong, Tatsuo Itoh 设计制作了基于复合左右手材料的基片集成波导缝隙天线阵^[3]; Junfeng Xu, Wei Hong 等人设计制作了一种“工”字形馈电网络的基片集成波导宽带缝隙天线阵列^[4]; Juhua Liu 等人设计了一种基片集成波导漏波天线^[5]。根据应用需要本文提出了一种新型的基于多层基片集成波导技术的背腔式缝隙天线,要求天线的中心频率 f_0 为 9.49 GHz,增益 G 不小于 6 dB,带宽不小于 80 MHz,极化方式为线极化。

1 波导缝隙辐射原理

缝隙天线的最初形式为在波导管、谐振腔或同轴管的壁上开的窄缝,使电磁波经缝隙向外空间辐射能量。基片集成波导有与金属波导相似的传播特性,因此在基片集成波导宽边开缝也可以获得具有辐射特性的缝隙结构。为了使缝隙具有辐射特性,必须使缝隙截断波导壁上的表面电流,被截断的表面电流转变为缝隙上的位移电流沿原方向流过缝隙,该位移电流的电力线将向空间辐射形成辐射场。

基片集成波导具有与传统金属波导相似的传播特性,但是由于其窄边为金属通孔而只能在宽边上进行开缝^[6],常见的开缝方法见图 1。

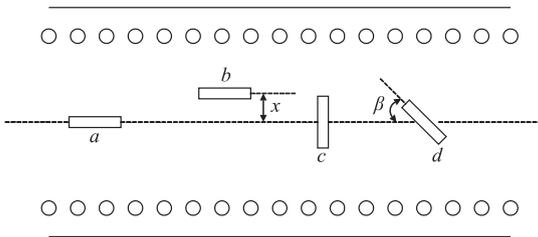


图 1 基片集成波导开缝方法

Fig.1 Slotting method of SIW

图 1 中, a 开缝方法的辐射强度最低,几乎没有辐射,因为这种缝隙截断的表面电流最小; $b \sim d$ 开缝方法均可获得较理想的辐射强度,并且可以通过调节缝隙中心距离基片集成波导中心的距离 x 和角度 β 来改变缝隙天线的激励,从而改变归一化电导或电阻。

2 设计与仿真

图 2 为天线的三维结构图。介质板材料为美国 ARLON($\epsilon_r = 2.2$, 厚度 1 mm)。谐振腔使用上层基片集成波导实现,在谐振腔的长边 2 侧分别开 2 对长度为半波长的缝隙,缝隙位置相互对称,保证了缝隙激励强度的一致,2 对缝隙分别处于场强最强

点的外侧,从而保证缝隙上位移电流方向的一致。

下层基片集成波导为阶状波导(Stepped Waveguide, SW)^[7]构成的馈电电路。其实现方法是一段较宽的 SIW 上形成矩形窗进行耦合,采用阶状波导可以降低加工误差对电路馈电性能的影响。

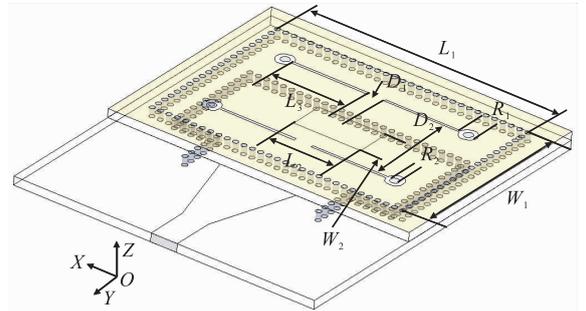


图 2 天线结构图

Fig.2 The structure of antenna

微波谐振腔是一种谐振特性的微波元件^[8],在 SIW 结构中,金属通孔围成的空腔都可以成为谐振腔,本文中采用微波谐振腔作为平衡结构,馈电点在谐振腔背部中央位置使其谐振于 TE_{201} 模,用作缝隙天线的对称场激励结构,可以保证 4 个缝隙获得幅度一致的激励电流,从而使天线产生稳定规则的天线方向图。谐振腔的场结构见图 3。

图 3 谐振腔的场结构图

Fig.3 The field structure of resonator

天线的等效电路见图 4。

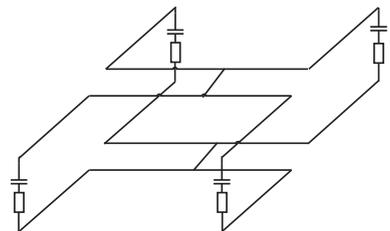


图 4 天线等效电路

Fig.4 The equivalent circuit models of antenna

使用 Stevenson 法分析此辐射缝隙,单个缝隙的等效阻抗为^[9]:

$$r = 0.523 \left(\frac{\lambda_g}{\lambda} \right)^3 \frac{\lambda^2}{a_{RWG} b} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{4a_{RWG}} \right) \cos^2 \left(\frac{\pi x}{a_{RWG}} \right) \quad (1)$$

式中: λ 为自由空间中的波长; λ_g 为波导波长; x 为缝隙中心到波导中心的距离; a_{RWG} 为基片集成波导

等效为传统金属波导的宽度; b 为介质板的高度。

根据所设计的天线的中心频率($f_0 = 9.49$ GHz)初步确定各结构的尺寸之后,使用 HFSS 11 进行建模仿真和优化,主要优化的尺寸为缝隙的长度和宽度(L_3 、 W_3)、缝隙圆环的内外径(R_1 、 R_2)。天线最终的结构尺寸见表 1, D_1 、 D_2 为缝隙间距。

表 1 天线几何参数

Tab. 1 Dimensions of antenna mm

| L_1 | W_1 | L_2 | W_2 | D_1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 20 | 8 | 4 | 2 |
| D_2 | L_3 | W_3 | R_1 | R_2 |
| 12 | 9 | 0.3 | 1 | 0.5 |

在传统对称振子天线的设计中,可以在振子的末端分别放置一个金属板来形成电荷聚集机制,使得导线上的电流趋于恒定,从而使天线获得较大的辐射电阻。将此原理应用于本文中天线的设计,可以通过在辐射缝隙一端加载缝隙圆环的方式实现。同时加载缝隙圆环还可缩短缝隙的长度并减少加工误差对缝隙性能的影响^[10]。加载缝隙圆环和未加载缝隙圆环时天线的回波损耗仿真对比见图 5。可见,加载缝隙圆环后,谐振中心频率的回波损耗显著降低,天线的带宽由 50 MHz 扩展到 150 MHz。

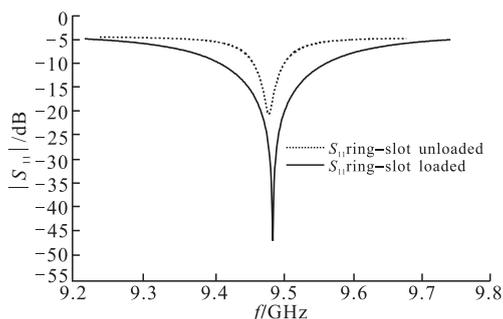


图 5 天线的回波损耗对比图

Fig.5 Contrast of return loss

3 实验分析

图 6 为测试样片,图 6(a)为下层基片集成波导构成的天线馈电电路,可见其阶状波导结构。图 6(b)为加工好的天线结构,可见上层基片集成波导谐振腔和谐振腔上开的辐射缝隙。天线使用 SMA 接头连接测试接口。天线的回波损耗见图 7,测量数据与仿真数据基本一致。方向图不同切面增益的测量结果见图 8,天线在中心频率 9.49 GHz 处最高增益为 8 dB,E 面半功率波瓣宽度 $\pm 45^\circ$,H 面半功率波瓣宽度 $\pm 32^\circ$ 。E 面交叉极化最高为 -12 dB,H 面交叉极化均在 -40 dB 以下,前后向辐射比约为 16 dB。

图 6 天线测试样片

Fig.6 Test structure of antenna

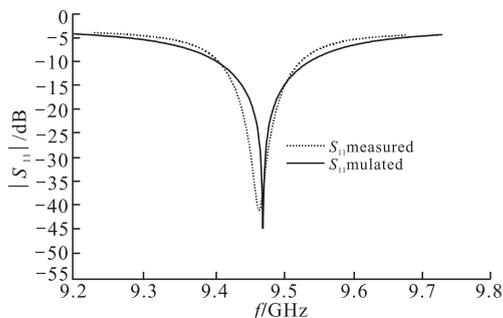


图 7 天线回波损耗测量结果

Fig.7 Measured return loss of antenna

图 8 天线不同切面方向图测量结果

Fig.8 Measured radiation patterns in different planer

4 结语

本文设计了一种新型的基片集成波导背腔式缝隙天线,天线中心频率为 9.49 GHz,回波损耗大于 10 dB 的带宽为 150 MHz。通过加载缝隙圆环使得天线的回波损耗大大降低,并对带宽展宽产生一定贡献。该天线具有平面结构和易集成的优点,特别适用于微波集成电路。并且天线从背腔的背面馈电,可以方便地实现天线组阵。

参考文献(References):

- [1] 朱红兵. 基片集成功率合成放大技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
ZHU Hongbing. Investigations on substrate integrated power combining amplifying technologies [D]. Nanjing: Southeast university, 2010. (in Chinese)

- [2] 邹雄, 童创明, 陈浩, 等. 新型基片集成波导三孔定向耦合器的设计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(3): 40-44.
ZOU Xiong, TONG Chuangming, CHEN Hao, et al. Design of a new three apertures directional coupler based on substrated waveguides [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(3): 40-44. (in Chinese)
- [3] Yuandan Dong, Tatsuo Itoh, Substrate integrated composite right-/left-handed leaky-wave structure for polarization-flexible antenna application [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60(2): 760-771.
- [4] Xu Junfeng, Chen Zhi Ning, Qing Xianming, et al. 140 GHz planar broadband LTCC SIW slot antenna array[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60(6): 7-10.
- [5] Juhua Liu, David R Jackson, Yunliang Long. Substrate integrated waveguide (SIW) leaky-wave antenna with transverse slots[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60(1): 20-29.
- [6] 李绪益. 电磁场与微波技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2000.
LI Xuyi. Electromagnetic field and microwave technology[M]. Guangzhou: South China university technology press, 2000. (in Chinese)
- [7] 徐俊峰, 蒯振起, 陈鹏. W波段多波束基片集成波导缝隙阵列天线[J]. 微波学报, 2009, 25(2): 1-5.
XU Junfeng, KUAI Zhenqi, CHEN Peng. W band multi-beam substrate integrated waveguide(SIW) slot array antenna[J]. Journal of microwaves, 2009, 25(2): 1-5. (in Chinese)
- [8] 王文祥. 微波工程技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
WANG Wenxiang. Microwave engineering technology [M]. Beijing: National defense industry press, 2009. (in Chinese)
- [9] S·西弗尔. 微波天线理论与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.
Silver S. Microwave antenna theory and design [M]. Beijing: Beijing aeronautics & astronautics university press, 1989. (in Chinese)
- [10] Martnez Jorge D, Mriam Taroncher, Vicente E Boria. Capacitively loaded resonator for compact substrate integrated waveguide filters[C]//Proceedings of the 40th European microwave conference. Paris: EuMC press, 2010: 192-195.

(编辑:田新华)

(上接第 36 页)

- [6] 周剑雄, 石志广, 胡磊, 等. 基于频域稀疏非均匀采样的雷达目标一维高分辨成像[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 926-934.
ZHOU Jianxiong, SHI Zhiguang, HU Lei, et al. Radar target one dimensional high resolution imaging based on sparse and non-uniform samplings in frequency domain[J]. Acta electronica sinica, 2012, 40(5): 926-934. (in Chinese)
- [7] Donoho D L. Compressed Sensing [J]. IEEE trans information theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [8] Donoho D L, Tsaig Y. Extensions of compressed sensing [J]. Signal processing, 2006, 86(3): 533-548.
- [9] 邱伟, 赵宏钟, 陈建军, 等. 基于平滑 L0 范数的高分辨雷达一维成像研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2869-2874.
QIU Wei, ZHAO Hongzhong, CHEN Jianjun, et al. High-resolution radar one-dimensional imaging based on smoothed L0 norm[J]. Journal of electronics and information technology, 2011, 33(12): 2869-2874. (in Chinese)
- [10] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 压缩感知回顾与展望[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1651-1662.
JIAO Licheng, YANG Shuyuan, LIU Fang, et al. Development and prospect of compressive sensing[J]. Acta electronica sinica, 2011, 39(7): 1651-1662. (in Chinese)

(编辑:田新华)