

[文章编号] 1007-7405(2016)04-0305-05

# 一种应用于汽车雷达的 SIW 带通滤波器

魏倩莹, 马中华

(集美大学信息工程学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 使用 HFSS 仿真软件设计了基于基片集成波导(substrate integrated waveguide, SIW)的带通滤波器。在 SIW 腔体中加入金属圆柱扰动, 形成带通滤波器, 并通过调节扰动金属柱的半径来调整带通滤波器的频带宽度和中心频率, 最后在 Rogers 5880 介质基板制作实物。测试结果表明: 中心频率为 24 GHz, 通带内插入损耗 2.4 dB、回波小于 -15 dB 的带宽为 300 MHz。仿真结果和实验测试结果基本相符。此带通滤波器能够应用在汽车雷达系统中。

**[关键词]** 基片集成波导; 带通滤波器; 渐变线; 汽车; 雷达

**[中图分类号]** TN 713.5

## A SIW Bandpass Filter Applied in Automotive Radar

WEI Qian-ying, MA Zhong-hua

(School of Information Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The substrate integrated waveguide (SIW) has numerous benefits, such as low insertion loss, high capacity, high quality factor and easily mass production. Due to SIW technology, the SIW bandpass filter is designed and simulated by HFSS simulation software in this paper. The characteristics of bandpass filter are formed by adding perturbations of metallic post in the SIW cavity. The bandwidth and center frequency of bandpass filter are adjusted by altering the radius of perturbations of metal cylinder. Finally, the filter is made on the substrate of Rogers 5880, the results are indicated: the center frequency is 24 GHz, insertion loss is 2.4 dB, the bandwidth is achieved 300 MHz that return loss is less than 15 dB. Simulation and examination results on the SIW bandpass filter show good agreement. This filter can be applied in circuits of automotive radar.

**Keywords:** SIW; bandpass filter; gradient line; automotive; radar

## 0 引言

汽车防撞雷达的研究开始于 20 世纪 60 年代, 主要在德国、日本和美国这些汽车工业比较发达的西方国家中展开<sup>[1-2]</sup>。汽车防撞雷达的研究关键在于选出回波信号, 这需要高性能的滤波器。因为汽车雷达工作在 24 GHz 频段, 相对带宽很小, 要在很窄的相对带宽上选出有用的信号, 对滤波器的性能要求很高。因为集总参数元件组成的滤波器只能适用于低频段, 当频率升高到微波频段, 由于集总参数元件的寄生效应, 滤波器的性能会发生很大变化, 因此构成滤波器单元要用分

**[收稿日期]** 2015-12-22

**[修回日期]** 2016-03-23

**[基金项目]** 福建省自然科学基金项目(2015J01657); 李尚大集美大学学科建设基金项目(ZC2014002); 大学生创新实验项目(Z815304)

**[作者简介]** 魏倩莹(1994—), 女, 硕士生, 从事射频电路设计方向研究。通信作者: 马中华(1973—), 男, 讲师, 射频微波电路和天线技术。E-mail: mzhxm@jmu.edu.cn.

布参数元件代替集总参数元件。于是，很多学者提出使用微带滤波器技术，如多模微带滤波器<sup>[3]</sup>、可调谐微带带通滤波器<sup>[4]</sup>、扇形短截线结构的椭圆微带低通滤波器<sup>[5]</sup>。但是微带滤波器是一个半开放的结构，会向空间辐射电磁波，造成辐射损耗。而吴柯教授<sup>[6]</sup>提出的基片集成波导（substrate integrated waveguide, SIW）技术是一种可以集成于介质基片中具有低插损低辐射等特性的导波结构，在上下底面为导电层的低损耗介质基片上，利用金属化通孔或者金属圆柱阵列而实现传统金属波导的功能。在汽车电子领域，SIW 目前主要应用在汽车雷达天线方面，如：Xu Junfeng 等<sup>[7]</sup>提出应用在汽车雷达的 SIW 缝隙天线阵列，Siew Bee Yeap<sup>[8]</sup>提出用四个 SIW 缝隙天线作为初馈的双层 PCB 的发射天线阵列，Ranade<sup>[9]</sup>提出应用在汽车雷达的基于 SIW 的喇叭天线，Wang Hsiao - Ning<sup>[10]</sup>提出应用在汽车防撞雷达的高增益 SIW 缝隙对天线。目前未见将 SIW 带通滤波器应用在汽车电子方面的文献报道。

1 24 GHz 基片集成波导带通滤波器设计

图 1 为基片集成波导的结构示意图<sup>[11]</sup>，信号在波导中传输时，波导表面产生表面电流，两边的金属柱或通孔会切断表面电流，发生辐射，使能量泄露。当金属柱或孔之间缝隙越小，能量泄露就越小。

用三维电磁场仿真软件（HFSS）仿真设计汽车雷达的 SIW 带通滤波器。中心频率为 24 GHz，带宽为 100 MHz，采用 Rogers 5880 介质基板，相对介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ ，介质损耗角的正切函数  $\tan\delta = 0.0009$ ，基板的厚度  $h = 0.5\text{ mm}$ 。可以确定相邻金属柱中心之间的距离  $p = 2\text{ mm}$ ，两排金属柱之间的距离  $a = 9\text{ mm}$ ，金属柱的直径  $d = 1\text{ mm}$ 。

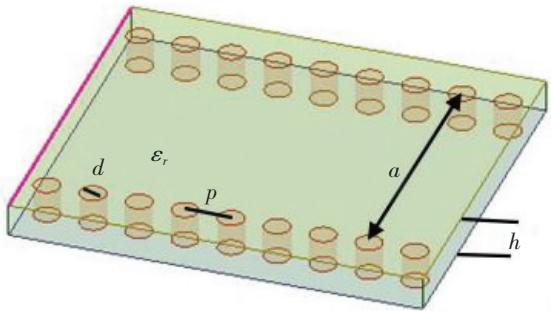


图 1 基片集成波导结构图  
Fig.1 Configuration of the SIW

微带线与基片集成波导的过渡段，采用梯形微带线渐变线结构，如图 2 所示。根据 SIW 端口的特性阻抗  $32\ \Omega$ ，计算得到锥形微带宽边的宽度  $W_1 = 3\text{ mm}$ 。梯形转换器窄边连接的是特性阻抗为  $50\ \Omega$  的微带线，因此窄边的宽度  $W_2 = 1.6\text{ mm}$ ，梯形渐变线的长度  $L = 5\text{ mm}$ 。

为了实现带通滤波器的特性，需要对 SIW 的腔体进行加扰。在基片集成波导的腔体中加载多个金属柱或金属通孔构成带通滤波器，其中间部分的感性金属柱等效成型网络（如图 3 所示）。等效为 T 型谐振电路，其中  $-jX_b$  等效为串联电容的容抗， $jX_a$  等效为并联电感的感抗。金属柱之间的间距约为二分之一一个波导波长，形成谐振腔。用金属柱的尺寸来控制谐振腔之间耦合的强弱，使整个结构起到滤波器的效果。图 4 为加入金属柱扰动后的 SIW 平面结构，中间金属柱直径为  $R_1$ ，其外边的小金属柱的直径为  $R_2$ 。

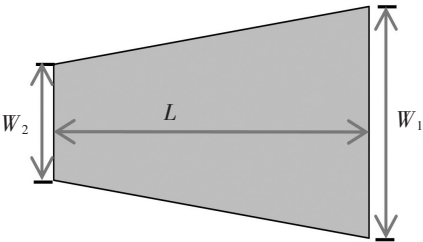


图 2 SIW 端口阻抗的转换结构  
Fig.2 Transition structure of SIW port impedance

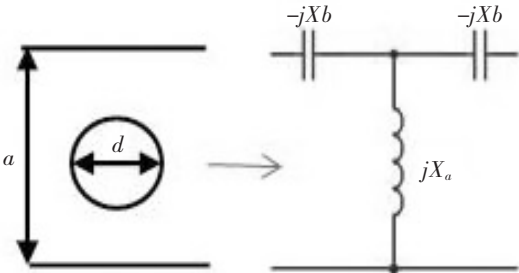


图 3 金属柱等效电路  
Fig.3 Metallic post equivalent circuit

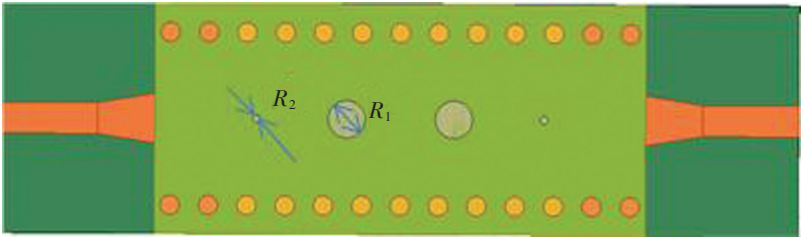


图 4 SIW 带通滤波器结构图

Fig.4 The configuration of SIW bandpass filter

2 实验结果

对于图 4 的结构, 保持其他条件不变, 仅改变 SIW 滤波器两排金属柱之间的距离  $a$ , 结果如图 5 所示。可以看到, 随着距离的增大, SIW 带通滤波器的中心频率下降。由于汽车雷达工作在 24 GHz 频段, 因而选择中心频率为 24 GHz 对应的  $a$ , 即  $a$  为 9 mm。

将距离  $a$  固定为 9 mm,  $R_2$  固定为 0.2 mm, 改变加扰中心大金属柱直径  $R_1$ , 根据回波损耗  $S(1,1)$  的变化 (如图 6 所示) 可以看到, 随着  $R_1$  的减小, 谐振频率降低, 带宽增大。

图 7 是  $R_2$  固定为 0.2 mm,  $R_1$  从 0.85 mm 到 1.1 mm 之间变化  $S(2,1)$  的传输特性曲线。由图 7 可知, 随着加扰中心大铜柱的直径增大, 带通滤波器的带宽减小, 且中心频率向高频移动, 滤波器的性能变差。

由图 6 可知, 当频率为 24 GHz 时, 可以看出  $R_1$  选取 0.95 mm 或者 0.975 mm 较好。由图 7 可知, 当频率为 24 GHz 时, 可以看出  $R_1$  选取 0.975 mm 或 1.00 mm 较好。结合图 6 和图 7, 选取  $R_1$  为 0.975 mm。

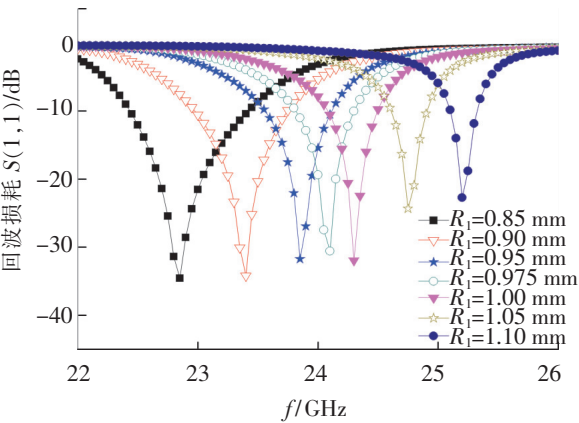


图 6  $R_2=0.2$  mm,  $R_1$  变化  $S(1,1)$  曲线

Fig.6 The  $S(1,1)$  curve for different  $R_1$  when  $R_2=0.2$  mm

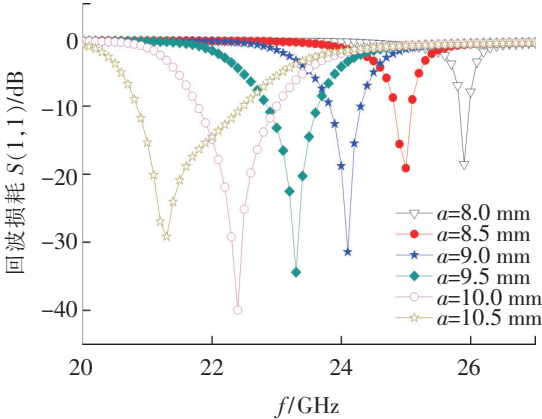


图 5 SIW 滤波器中心频率随  $a$  的变化

Fig.5 The center frequency of SIW filter for different  $a$

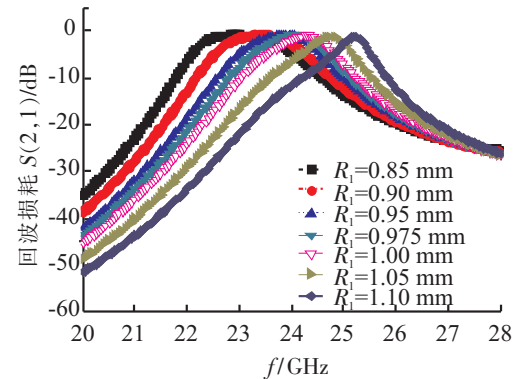


图 7  $R_2=0.2$  mm,  $R_1$  变化  $S(2,1)$  曲线

Fig.7 The  $S(2,1)$  curve for different  $R_1$  when  $R_2=0.2$  mm

图 8 和图 9 是固定  $R_1=0.975$  mm 时, 两个中心小铜柱的直径  $R_2$  变化时,  $S(1,1)$  和  $S(2,1)$  的变化曲线。 $R_2$  从 0.2 mm 到 0.45 mm 变化, 滤波器的中心频率变化相对  $R_1$  变化时改变缓慢, 且逐渐降低。 $R_2$  对带宽改变不明显, 但是插入损耗随着  $R_2$  的增大而增大。综上分析, 选取加扰小铜柱的直径  $R_2=0.2$  mm。

图 10 为所设计的 24 GHz SIW 带通滤波器的电场分布图，可见电磁集中在 SIW 内部，几乎没有向外辐射。而且大扰动铜柱之间的场强最强，它对滤波器性能的影响最大。

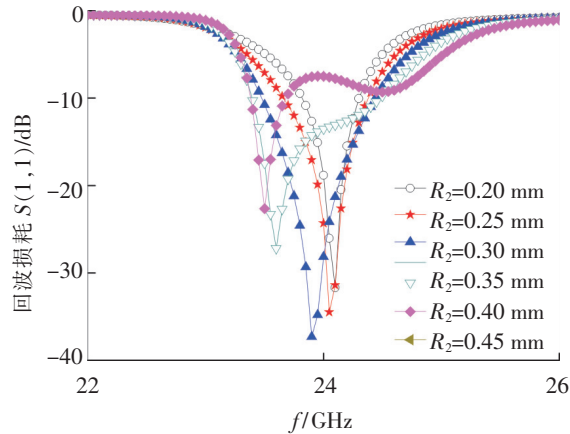


图 8  $R_1=0.975$  mm,  $R_2$  变化  $S(1,1)$  曲线

Fig.8 The  $S(1,1)$  curve for different  $R_2$  when  $R_1=0.975$  mm

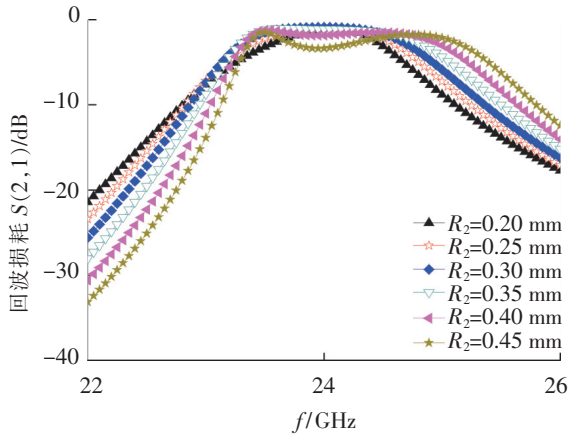


图 9  $R_1=0.975$  mm,  $R_2$  变化  $S(2,1)$  曲线

Fig.9 The  $S(2,1)$  curve for different  $R_2$  when  $R_1=0.975$  mm

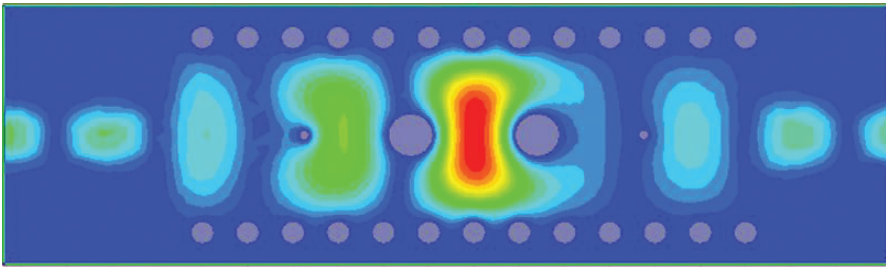


图 10 SIW 带通滤波器的电场分布

Fig.10 Electric-field distribution of SIW bandpass filter

根据以上 SIW 仿真结果的结构参数，在 Rogers 5880 介质基板制作了基于 SIW 带通滤波器。图 11 为 SIW 带通滤波器特性测试示意图。使用安捷伦公司矢量网络分析仪 E8363C 测试频率响应特性。图 12 所示为 24 GHz 带通滤波器仿真和测试频率响应曲线，仿真中心频率在 24 GHz，回波损耗 30 dB，插入损耗 1 dB，回波损耗小于 15 dB 的频带宽度为 250 MHz，带内的插入损耗 1.1 dB。测试 SIW 带通滤波器插入损耗为 2.4 dB，回波损耗为 25 dB，回波损耗小于 15 dB 的带宽大概为 300 MHz。测试结果和仿真结果基本相符，证明了该 SIW 滤波器设计的正确性。

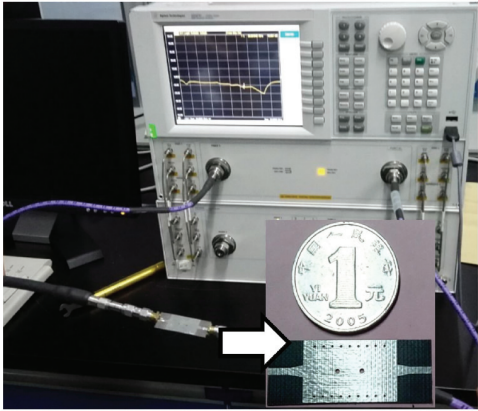


图 11 SIW 测试示意图

Fig.11 Measurement setup block diagram of the SIW experiment

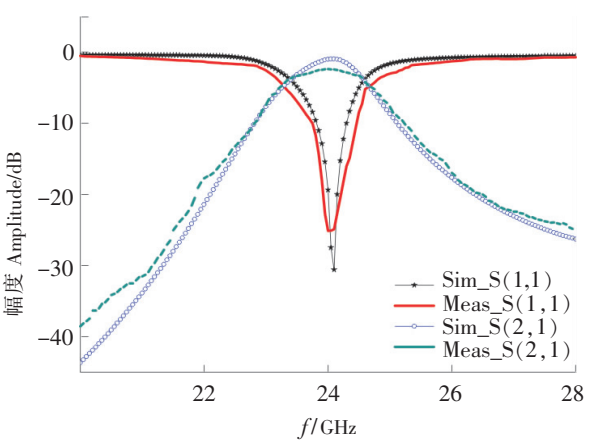


图 12 SIW 带通滤波器频率响应曲线

Fig.12 Frequency-response curve of SIW bandpass filter



### 3 结论

本研究利用 HFSS 软件设计了基于 SIW 铜柱加扰应用于汽车防撞雷达的带通滤波器,可以通过改变加扰的大铜柱直径对带宽和中心频率进行粗调,通过加扰的小铜柱的直径进行微调。根据仿真优化的结构参数制作了 SIW 实物并进行了测试。仿真和测试的结果表明:仿真中心频率在 24 GHz,回波损耗 30 dB,插入损耗 1 dB,回波损耗小于 15 dB 的频带宽度为 250 MHz,带内的插入损耗 1.1 dB。测试 SIW 带通滤波器插入损耗为 2.4 dB,回波损耗为 25 dB,回波损耗小于 15 dB 的带宽大概为 300 MHz。测试结果和仿真结果基本相符。本设计的滤波器插入损耗小,通带内反射较小,能够和电路共形,易于批量生产,可应用在防撞汽车雷达中。

### [ 参考文献 ]

- [1] 张建辉,刘国岁,顾红,等. 多斜率步进调频连续波信号在汽车防撞雷达中的应用. 电子与信息学报, 2002, 24(2): 232-237.
- [2] 韩俊峰,张惠敏,潘盛辉,等. 汽车防撞雷达概述. 广西工学院学报, 2011, 22(4): 54-58.
- [3] 邓哲,程崇虎,朱洪波. 一种多模微带方形贴片带通滤波器的设计. 微波学报, 2006, 22(6): 55-58.
- [4] 周研,刘祖深,陈应兵. 一种新型可调谐微带带通滤波器的设计. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9): 866-871.
- [5] 邓世雄,陈星,李德治. 扇形短截线结构的椭圆微带低通滤波器设计. 电子测量技术, 2012, 35(8): 35-37.
- [6] WU K, DESLANDES D, CASSIVI Y. The substrate integrated circuits-a new concept for high-frequency electronics and optoelectronics. Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2003, 1(2): P - III-P-X. DOI:10.1109/TELSKS.2003.1246173.
- [7] XU J F, CHEN Z N, QING X M. CPW center-fed single-layer SIW slot antenna array for automotive radars. IEEE Transactions on antennas and propagation, 2014, 62(9): 4528-4536. DOI:10.1109/TAP.2014.2330587.
- [8] SIEW BEE YEAP, QING X M, CHEN Z N. 77-GHz dual-layer transmit-array for automotive radar applications. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(6): 2833-2837. DOI:10.1109/TAP.2015.2419691.
- [9] RANADE S R, NAIR D U. Design of a substrate integrated wave guide H plane horn antenna on a PTFE substrate for automotive radar application//2011 IEEE Applied electromagnetics conference (AEMC). Kolkata: IEEE, 2011: 1-3. DOI: 10.1109/AEMC.2011.6256833.
- [10] WANG H N, HU H W, CHUNG S J. High gain slot-pair substrate-integrated-waveguide antenna for 77 GHz vehicle collision warning radar// Proceedings of the 11th European radar conference. Rome: IEEE, 2014: 569-572. DOI:10.1109/EuRAD.2014.6991334.
- [11] DESLANDES D, WU K. Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54(6): 2516-2526. DOI:10.1109/TMTT.2006.875807.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)