文章编号:1001-893X(2011)03-0037-04

新型 Koch 岛分形耦合微带线带通滤波器*

李天鹏,王光明,梁建刚

(空军工程大学导弹学院,陕西三原 713800)

摘 要:为抑制平面带通滤波器的二次谐波,实现高选择性和低插入损耗,提出了一种新型 Koch 岛分形结构,并将其应用到平面耦合微带线带通滤波器的设计中。仿真及测试结果表明:所设计的新型 Koch 岛分形耦合微带线带通滤波器的中心频率为3 GHz,3 dB通带宽度为10%;与传统的耦合微带线带 通滤波器相比,该新型滤波器的二次谐波降低了11.5 dB,选择特性提高了5 dB/GHz,通带内最大回波损 耗降低了4.7 dB,尺寸缩小了近5%。该新型滤波器具有尺寸小、重量轻、成本低且性能好等优点。 关键词:微波电路:耦合微带线;带通滤波器:Koch 岛;分形结构;谐波抑制

中图分类号:TN713 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.03.009

A Novel Microstrip Coupled-Line Bandpass Filter Based on Koch Island

LI Tian-peng, WANG Guang-ming, LIANG Jian-gang

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: To suppress the second harmonic and realize high selectivity and low insertion loss, a novel microstrip coupled – line bandpass filter(BPF) operating at 3 GHz is presented by introducing Koch-island-fractal-shaped structure. Simulation and measurement results indicate that the proposed filter is with significant superiority in terms of 11.5 dB of deeper suppression of second harmonic, steeper selectivity of 5 dB/GHz, better insertion loss of 4.7 dB as well as 5% of size reduction with respect to its conventional counterpart. The 3 dB bandwidth (insertion loss) is up to 10%. What's more, the designed filter has such advantages as small size, light weight, low cost, and good capability.

Key words: microwave circuit; microstrip coupled-line; bandpass filter(BPF); Koch island; fractal-shaped structure; harmonic suppression

1 引 言

随着无线通信、雷达和遥感等技术的不断发展, 系统对分频和选频的要求也越来越高,正因为滤波 器具有选频功能,所以系统对微波滤波器也提出了 越来越高的要求。耦合微带线带通滤波器因具有尺 寸小、重量轻、成本低、易于加工等优点,在微波电路 和系统中得到了广泛的应用[1-3]。

由于耦合微带线的长度在中心频率处约等于四 分之一导波长,因此一般的耦合微带线带通滤波器 的二次谐波输出很大,这就严重限制了其应用。为 抑制其谐波输出,国内外的研究人员做了大量工作: (1)改变原有的耦合原理,如在耦合微带线之间

接入一段微带线的 SIR(Stepped-impedance Resonators)

 ^{*} 收稿日期:2010-11-03;修回日期:2011-01-13
 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971118)
 Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.60971118)

带通滤波器以增加耦合微带线之间的耦合^[4]。

(2)在地板上腐蚀工作频点为滤波器二次谐波频率的带阻周期结构,如 EBG^[5](Electromagneticbandgap)、SRR^[6](Split-ring Resonators)等。

(3)在输出端增加低通滤波器^[7],增加的低通 结构的截止频率处于带通滤波器的中心频率和二次 谐波频率之间。然而,这三类方法不是由于增大了 原有尺寸的原因,就是由于加工困难或是不利于封 装、价格昂贵等的原因,不利于推广。

(4)把耦合微带线调制成各种形状,如 Koch 岛型^[8]。这类方法不仅简单有效、易于加工,而且可以 实现高选择性和低插入损耗^[9],应用前景广阔。

本文运用第四类方法,在普通耦合微带线带通 滤波器的基础上,把微带线腐蚀成一种新型 Koch 岛 结构,该分形结构的水平方向迭代长度为 0.35*l*,垂 直方向的迭代深度为 0.25*l*。软件仿真结果表明: 与普通耦合微带线带通滤波器相比,新型滤波器的 二次谐波损耗由 – 19.89 dB降为 – 31.39 dB,选择特 性由131 dB/GHz提升到136 dB/GHz,通带内最大回 波损耗由 – 10.89 dB降为 – 15.59 dB,且电路板尺寸 减小为原来的95.4%。加工了实物并进行了实验测 量,测量结果与仿真结果基本吻合。

2 新型 Koch 岛分形结构的设计

德布罗特于 1975 年发表了其划时代专著,第一次系统地阐述了分形几何的思想、内容、意义和方法。目前分形最为流行的一个概念是:分形是一种 具有自相似特性的现象、图像或者物理过程。经典的分形结构有 Koch 分形结构、Cantor 分集、Sierpinski 垫片和地毯、Hilbert 分形结构、Moore 分形及皇冠分 形结构等。

通常,具有分形结构的物体都有比例自相似性 和空间填充性这两大特点,因此,如果把分形的这两 大特点应用到滤波器设计上,能够达到有效抑制滤 波器的高次谐波、产生传输零点、使滤波器结构更加 紧凑等效果,从而促进滤波器的性能提高和尺寸小 型化。

一般带通滤波器的参数指标主要包括中心频 率、通带插入损耗、通带回波损耗、3 dB通带宽度、选 择特性 *ε* 等,其中选择特性 *ε* 由公式(1)计算^[10]:

$$\xi = (a_2 - a_1)/(f_2 - f_1) \tag{1}$$

式中, a1表示3 dB插损, a2表示20 dB插损, f1表示

3 dB插损对应的频点, f_2 表示20 dB插损对应的频点, ϵ 的单位为 dB/GHz。

本文提出的新型 Koch 岛分形结构如图 1 所示, 水平方向的迭代深度为0.35*l*,垂直方向的迭代深度 为0.25*l*,迭代次数为 0、1、2 次的迭代示意图分别如图 1(a)、(b)、(c)所示,其中 Koch 0 代表第 0 次迭代,Koch 1 代表第 1 次迭代,Koch 2 代表第 2 次迭代。



图 1 新 Koch 岛分形结构的形成示意图 Fig. 1 Novel Koch island fractal elements

根据图 1,把该结构应用于耦合微带线上,可以 得出相应的基于 Koch 岛分形结构的耦合微带线,其 单节结构如图 2 所示。



图 2 基于 Koch 岛分形结构的耦合微带线 Fig. 2 Microstrip coupled-line based on Koch island

3 新型 Koch 岛分形耦合微带线带通滤波器

带通滤波器的设计指标为:中心频率 f_c = 3 GHz;3 dB通带宽度的相对带宽 BW = 10%;通带衰减等于或小于1 dB;阻带衰减为在4 GHz处至少有 20 dB衰减;端接条件为两输出端接50 Ω微带线;微带材料介电常数 ϵ_r = 2.65,介质厚度 h = 2 mm,损耗 角正切 tan δ_ϵ < 0.001。

由于涉及耦合微带线带通滤波器分析和设计的 资料已相当丰富,方法已非常成熟,这里不再赘述。 根据耦合微带线带通滤波器的设计方法,可以得出 耦合微带线的节数 n = 5,最初的各段耦合微带线的 参数可以由经典公式^[7]获得。由于分形结构延长了 电流路径,这就相当于延长了微带线的长度,因此, 其尺寸需要适当缩减,经平面电磁仿真软件 Ansoft Desinger 仿真并优化,可以得到新型 Koch 岛分形结 构的耦合微带线带通滤波器结构的最终尺寸。表 1 给出了 Koch 0、Koch 1 的最终尺寸,其中 n 表示耦合

· 38 ·

微带线带通滤波器所采用的节数, w_n 表示第 n 节耦 合微带线的宽度, s_n 表示第 n 节耦合微带线的耦合 缝隙宽度, l_n 表示第 n 节耦合微带线的实际长度。 由于二次分形结构的设计与加工较复杂, 因此本文 只对一次分形进行研究。

表 1 Koch 0、Koch 1 岛耦合微带线带通滤波器的物理尺寸 Table 1 The physical dimensions of microstrip coupled-line bandpass filter based on Koch 0 and Koch 1 island

*	/	s_n/mm	l_n /mm		
n	w_n / mm		Koch 0	Koch 1	
1和5	2.00	0.80	16.65	16.40	
2和4	2.60	2.25	16.45	16.20	
3	2.70	2.80	16.45	16.10	

采用软件 Ansoft Desinger 仿真,得出基于 Koch 0、 Koch 1 所设计的带通滤波器的 S 参数, 如图 3 和图 4 所示。由图3和图4的仿真结果可知,相对于传统的 耦合微带线带通滤波器来说,在回波损耗没有受到影 响的情况下,分形耦合带通滤波器在其性能上获得了 有效提高:首先,在抑制二次谐波方面,插入损耗由原 来的-19.89 dB降为-31.39 dB,降低了11.5 dB;其 次,在选择性方面,选择特性由原来的131 dB/GHz上 升到136 dB/GHz,提高了5 dB/GHz;再次,在通带性能 上,通带内最大反射损耗由原来的-10.89 dB降为 - 15.59 dB,降低了4.7 dB;最后,在小型化方面,电路 板大小也有减小,尺寸缩减为原来的95.4%。出现这 种效果的原因是:该分形结构降低了电流的不连续 性,增加了电流路径,从而使得电流传输趋于平缓,最 终达到降低反射损耗、抑制二次谐波的目的;同时,由 于电流路径变长了,相当于延长了传输线的长度,因 此,在频率保持不变的情况下,微带线的长度要相应 减小,但由于本文所提出的结构延长电流路径的程度 不大,因此小型化的程度不高。



图 3 Koch 0 耦合微带线带通滤波器的 S 参数仿真结果 Fig. 3 Simulation results of microstrip coupled-line bandpass filter based on Koch 0 island



图 4 Koch 1 耦合微带线带通滤波器的 S 参数仿真结果 Fig.4 Simulation results of microstrip coupled-line bandpass filter based on Koch 1 island

为了验证所提出方法的可靠性,对以上设计的 Koch 1 进行了实物加工,图 5 给出了实物的照片。 使用矢量网络测量仪对实物进行了实验测量,图 6 给出了测量结果与实测结果的比较图。由图 6 可 知,仿真结果与测量结果基本吻合,只有微小的频率 偏移,在误差范围之内,这可能是由于加工误差和使 用的介质板的介电常数分布不均匀原因导致的。表 2 比较了本文设计的带通滤波器与文献[12]设计的 带通滤波器的性能。



图 5 Koch 岛耦合微带线带通滤波器的实物图 Fig.5 Fabricated prototype of microstrip coupled-line bandpass filter based on Koch island



图 6 Koch 1 耦合微带线带通滤波器的 S 参数测量 结果与仿真结果的比较

Fig.6 Simulation and measurement results of microstrip coupled-line bandpass filter based on Koch 1 island

表 2	本文设计的带通滤波器与文献[12]设计
	的带通滤波器的性能比较

Table 2 BPF performance comparison between

this work and reference [12]								
带通滤	波器类型	中心 频率 /GHz	3 dB 带宽 /GHz	二次 谐波 <i>え</i> dB	选择 特性 /(dB /GHz)	通带 插损 /dB		
本文	仿真结果	3.07	0.29	31.39	136	0.35		
	实测结果	3.01	0.28	29.09	130	0.38		
文献[12]	仿真结果	2.40	0.30	25.20	46	0.40		
	实测结果	2.39	0.28	24.50	41	0.40		

4 结 论

本文在传统的耦合微带线带通滤波器的基础 上,设计了一种基于 Koch 岛的分形耦合微带线带通 滤波器。仿真和实验结果表明,与传统的耦合微带 线带通滤波器以及文献[12]所设计的滤波器相比, 该新型滤波器不但具有谐波抑制的功能,而且在高 选择性和低反射损耗方面的性能也很好,可以广泛 应用于放大器、振荡器和混频器等微波电路中。此 外,该新型滤波器还实现了小型化。仿真和实测结 果吻合较好,证明了设计的合理性。

参考文献:

- [1] Hong J S, Lancaster M J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications [M]. New York: Wiley & Sons, 2001.
- [2] Blondy P, Brown A R, Crost D, et al. Low Loss Micro ma Chined Filters for Millimeter-Wave Telecommunication Systems [C] // Proceedings of IEEE MIT-S International Microwave Symposium Digest. Baltimore, MD: IEEE, 1998: 1181 – 1184.
- [3] 崔鹤,魏彦玉,曹锐,等.双模微带三角形贴片滤波器的 改进设计[J].雷达科学与技术,2010,2(1):91-94.
 CUI He, WEI Yan-yu, CAO Rui, et al. Improvement Design of Dual-Mode Microstrip Triangular Patch Filter[J]. Radar Science and Technology,2010,2(1):91-94. (in Chinese)
- [4] Makimoto M, Yamashita S. Bandpass filters using parallel coupled stripline stepped impedance resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1980, 28 (12):1413-1417.
- [5] Yang F R, Ma K P, Qian Y, et al. A uniplanar compact photonic bandgap (UC - PBG) structure and its applications for microwave circuit [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(8): 1509 - 1514.
- [6] García García J, Martin F, Falcone F, et al. Spurious passband suppression in microstrip coupled line band pass filters by means of split ring resonators [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(9):416-418.
- [7] Pozar D M. Microwave Engineering [M]. 2nd ed. New York: John Wiely & Sons, 1998: 160 – 163.

- [8] Kim I K, Kingsley N, Morton M, et al. Fractal-shaped microstrip coupled-line bandpass filters for suppression of second harmonic[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2005, 53(9): 2943 – 2948.
- [9] 陈文灵.分形几何在微波工程中的应用研究[D].西安: 空军工程大学,2008.

CHEN Wen-ling. Investigations into the applications of fractal geometry in microwave engineering[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008. (in Chinese)

- [10] Li Lingyu, Liu Haiwen, Teng Baohua, et al. Novel microstrip lowpass filter using stepped impedance resonator and spurline resonator[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(1):196-197.
- [11] 杨红卫,隋允康.波导介质层 PBG 结构滤波器的优化 设计[J].电讯技术,2007,47(1):60-63.
 YANG Hong-wei,SUI Yun-kang.Optimized Design of Dielectric Layer PBG Structure in Waveguide Filter[J].Telecommunication Engineering,2007,47(1):60-63.(in Chinese)
- [12] 赵建中,杨瑾屏,杨国,等.一种具有谐波抑制特性的 窄带带通滤波器设计[J].西安电子科技大学学报(自 然科学版),2009,6(3):568-572.
 ZHAO Jian-zhong, YANG Jin-ping, YANG Guo, et al. Design

of a compact narrow bandpass filter with harmonics suppression [J]. Journal of Xidian University, 2009, 6(3): 568 – 572. (in Chinese)

作者简介:

李天鹏(1988 -),男,安徽明光人,硕士研究生,主要从 事分形、左手媒质及其在微波电路中的应用等研究;

LI Tian-peng was born in Mingguang, Anhui Province, in 1988. He is now a graduate student. His research concerns fractal, left-handed materials and their applications in microwave circuit.

Email: htp19880812@163.com

王光明(1964 -), 男, 安徽砀山人, 分别于 1982 年、1990 年获空军导弹学院学士及硕士学位, 于 1994 年获电子科技 大学博士学位, 现为空军工程大学教授、博士生导师, 主要从 事天线与毫米波电路、电磁兼容、电磁散射与逆散射等研究;

WANG Guang-ming was born in Dangshan, Anhui Province, in 1964. He received the B.S. degree, the M.S. degree in Air Force Missile Institute and the Ph. D. degree in University of Electronic Science and Technology of China in 1982, 1990 and 1994, respectively. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research interests include antenna and millimeter wave circuit, EMC, scatter and inverse scatter of electromagnetic wave, and so on.

梁建刚(1975-),男,安徽肥东人,分别于 1997 年、2000 年、2004 年获空军导弹学院学士、硕士及博士学位,现为空军 工程大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为分形、左手媒 质及其在微波电路中的应用等。

LIANG Jian-gang was born in Feidong, Anhui Province, in 1975. He received the B. S. degree, the M. S. degree and the Ph.D. degree in Air Force Missile Institute in 1997, 2000 and 2004, respectively. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns fractal, lefthanded materials and their applications in microwave circuit.

· 40 ·