

一种采用互补结构的宽阻带共模缺陷地滤波器

曾志斌 姚引娣 庄奕琪

A broad stopband common-mode suppression defected ground structure filter with complementary structure

Zeng Zhi-Bin Yao Yin-Di Zhuang Yi-Qi

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 164101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海面与其上方双矩形截面柱复合散射的混合算法研究

[Study on composite electromagnetic scattering from the double rectangular cross-section columns above rough sea surface using hybrid method](#)

物理学报.2015, 64(17): 174101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174101>

基于十字形结构的相位梯度超表面设计与雷达散射截面缩减验证

[Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient metasurface based on cruciform structure](#)

物理学报.2015, 64(16): 164102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164102>

基于变换光学的椭圆形透明聚集器的设计研究

[Design and study of the elliptically cylindrical transparent concentrator based on transformation optics](#)

物理学报.2015, 64(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154102>

超材料谐振子间的电耦合谐振理论与实验研究

[Theoretical and experimental study of the electric resonant coupling between two metamaterial resonators](#)

物理学报.2015, 64(14): 144101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144101>

基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法

[Inversion of regional range-dependent evaporation duct from radar sea clutter](#)

物理学报.2015, 64(12): 124101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124101>

一种采用互补结构的宽阻带共模缺陷地滤波器*

曾志斌^{1)†} 姚引娣²⁾ 庄奕琪¹⁾

1)(西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

2)(西安邮电大学通信与信息工程学院, 西安 710121)

(2014年11月30日收到; 2015年3月12日收到修改稿)

为了抑制高速差分信号传输中的共模噪声, 提出了一种基于低成本FR4材料制作的互补型缺陷地结构(defected ground structure, DGS)共模阻带滤波器. 滤波器两边采用对称性酒杯形DGS结构, 中间采用对称伞形DGS结构. 由于这两种DGS结构互补, 整个滤波器结构紧凑, 可以实现小面积设计目的; 另外, 由于三个DGS结构相邻较近, 相互之间存在互感, 可以通过改变相互之间的距离来调节相互之间的互感, 从而实现宽阻带滤波的目的. 仿真和测试结果表明, 该DGS滤波器的差模信号损耗小, 在抑制共模噪声20 dB条件下其阻带范围为4.8—11.4 GHz, 而且面积仅为10 mm × 10 mm. 与周期性DGS结构相比, 本方法在相同共模噪声抑制深度下, 具有占用面积不到30%、阻带宽度增加约50%等优点.

关键词: 阻带滤波器, 缺陷地结构, 共模, 互补结构

PACS: 41.20.Jb, 84.40.Dc, 84.32.-y

DOI: 10.7498/aps.64.164101

1 引言

高速数据传输的信号完整性已成为研究的热点. 差分技术具有较强的抗环境噪声和低电磁干扰等优点, 已成为高速数据传输等通信系统中的标准数据传输方式. 然而, 在实际电路设计中, 差分线的不平衡布线、时钟抖动以及地平面结构都有可能产生共模噪声, 从而对系统信号的完整性造成破坏, 严重时造成系统无法正常工作.

传统的共模滤波器可以有效抑制共模噪声, 但它一般采用元器件形式, 需要占用一定体积, 滤波带宽一般低于GHz量级, 并且费用高. 目前采用基于标准印制电路板(print circuit board, PCB)的电磁带隙结构(electromagnetic bandgap, EBG)和缺陷地结构(defected ground structure, DGS)共模滤波器成为研究热点, 它成本低、易于制造, 并且具有GHz量级以上的共模噪声抑制能力. EBG结构^[1-5]一般采用周期性的块状结构, 它能够使

特定阻抗频段内的电磁波完全不在其中传输, 具有明显的禁带特性. 目前的EBG结构主要采用蘑菇形和平面形等两种结构, 可以获得较宽的阻带带宽, 但由于周期性结构, 需要占用较多的面积. 因此, 小型化^[6]是EBG结构设计需要解决的问题. DGS滤波器^[7]采用在地平面上蚀刻特定的图案, 通过改变返回路径的电流达到阻带目的. DGS结构简单、面积小、易于电磁场理论分析和等效电路建模^[8]分析, 更适合嵌入式系统和集成电路实际应用. 作为典型DGS滤波器的哑铃形DGS滤波器^[9]采用单个哑铃形DGS结构. 文献^[10]提出了一种采用螺旋环的DGS结构, 并给出其等效电路模型. 然而, 这种滤波器只采用单个DGS结构, 滤波范围有限. 因此, 如何拓展滤波范围成为研究的热点. 文献^[11]给出了一种新的DGS等效LC模型并进行了推导. 文献^[12]针对高速差分信号提出了一种周期性分布哑铃形DGS, 通过周期性地复制三个哑铃形DGS提高其共模阻带宽度, 它在共模插入损耗小于-20 dB时的阻带范围在

* 国家重大科技专项(批准号: 2012ZX03001018-001)和中央高校基本科研业务费(批准号: JB151109)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zbzeng@163.com

3.3—5.7 GHz, 阻带带宽为2.4 GHz, 但其所占面积为15 mm × 24 mm. 文献[13]设计了一种新型周期性DGS结构, 它通过对差分微带线加入周期性分支节的加载结构, 有效地拓宽滤波带宽, 其滤波范围为3.2—8.6 GHz. 文献[14]提出了一种新型的DGS结构, 它包括7个DGS, 两侧各采用三个周期性的哑铃形DGS, 中间是一个C形DGS, 其滤波范围为3.4—10.9 GHz, 但它占用面积较大, 约14.5 mm × 110.4 mm. 文献[15]提出在降低PCB板厚度的同时采用两个U形及一个H形DGS来扩展滤波范围, 它在共模插入损耗小于-15 dB的条件下阻带范围为3.6—9.1 GHz, 阻带带宽为5.5 GHz, 其所占面积为10 mm × 10 mm. 文献[16]提出了一种利用分形理论的DGS滤波器, 它在共模插入损耗小于-20 dB的条件下阻带宽度为4.89 GHz, 但其占用面积较大, 约30 mm × 12 mm. 文献[17]提出了采用两个C形和一个H形组成的DGS滤波器, 其中一个C形通过过孔与顶层两微带小块相连, 它在共模插入损耗小于-15 dB的条件下阻带范围为3.68—8.43 GHz, 所占面积为8.5 mm × 7.5 mm, 但其易受过孔影响. 文献[18]提出采用多组三角形的DGS滤波器实现较宽范围的滤波效果, 但其所占面积为30 mm × 16 mm. 如何实现小面积、宽阻带、低成本的DGS滤波器仍值得研究.

为了实现小面积宽阻带滤波器设计, 本文提出一种紧凑型三阶DGS滤波器结构. 该滤波器正对于高速差分线下方, 成对称分布以降低共模噪声激励; 两边采用对称酒杯状DGS结构, 中间采用对称伞形DGS结构, 从而实现紧凑型滤波器设计. 由于三个DGS结构紧凑, 相互之间存在互感; 通过选取合适的DGS尺寸参数, 可以利用该互感特性扩展滤波范围, 从而达到小面积宽阻带的目的.

2 互补型DGS结构共模滤波器设计与分析

互补型DGS结构共模滤波器模型结构如图1所示, 该滤波器的两端为对称酒杯状的DGS结构, 中间采用对称伞状DGS结构. 其中, 酒杯状DGS结构两端采用半径为 R_2 的半圆形, 这两端通过一个长为 $L_2 - 2R_1$ 的细缝连接. 对称伞状DGS结构顶宽为 L_3 , 底宽为 L_5 , 高为 L_4 , 两侧为曲径是 R_2 的弧面.

该DGS滤波器等效电路模型如图2所示, 三个DGS可以分别等效为三个LC滤波, 由于三个DGS结构紧凑, 相互之间存在互感, 其中 M_1 和 M_2 为两相邻互感, M_3 为两边DGS之间产生的互感.

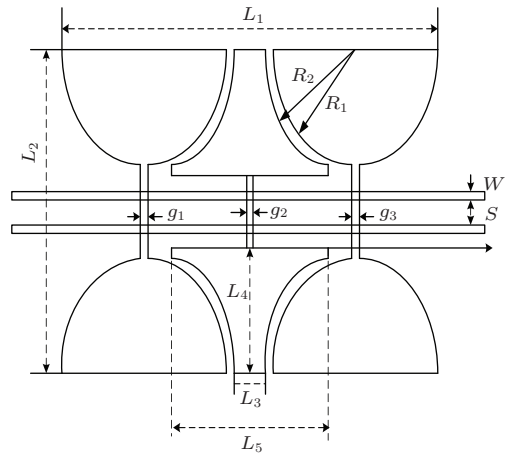


图1 互补型宽阻带DGS滤波器原理图
Fig. 1. Schematic diagram of the complementary broad stopband DGS filter.

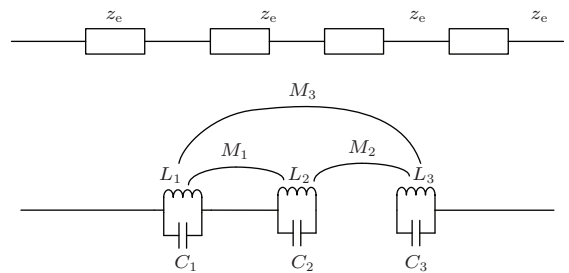


图2 互补型宽阻带DGS滤波器等效电路图
Fig. 2. Equivalent circuit of the complementary broad stopband DGS filter.

目前通过公式推导直接计算以上三个DGS结构等效LC参数仍然十分困难, 这里提出一种结合仿真获得的谐振频率点和3 dB截止频率点来推导其等效参数的简便方法.

各DGS模型对应的等效共模阻抗 $Z_i (i = 1, 2, 3)$ 可以表示为

$$Z_i = j\omega L_i \parallel \frac{1}{j\omega C_i} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 L_i C_i}. \quad (1)$$

差分信号线共模传输系数 $S_{21}(i) (i = 1, 2, 3)$ 可以表示为

$$S_{21}(i) = \frac{2Z_e}{2Z_e + Z_i}; \quad (2)$$

根据-3 dB截止频率定义, 可知

$$|S_{21}(i)|_{-3\text{dB}}^2 = \left| \frac{2Z_e}{2Z_e + Z_i} \right|^2 = \frac{1}{2}, \quad (3)$$

式中 Z_e 为耦合差分微带线的共模阻抗。

将 (1) 式代入 (3) 式, 该 LC 振荡器的参数可以表示为

$$2Z_e = \frac{\omega_c L_i}{1 - \omega_c^2 L_i C_i}, \quad (4)$$

式中 ω_c 为在衰减 -3 dB 时的截止角频率. 各 LC 振荡器的谐振频率 f_{oi} 可以表示为

$$f_{oi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C_i}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

联立 (4) 和 (5) 式, 该等效电路模型电感参数 L_i 和电容参数 C_i 可以表示为

$$L_i = \frac{Z_e}{\pi f_{ci}} \frac{f_{oi}^2 - f_{ci}^2}{f_{oi}^2}, \quad (6)$$

$$C_i = \frac{1}{4\pi Z_e} \left(\frac{f_{ci}}{f_{oi}^2 - f_{ci}^2} \right). \quad (7)$$

根据 DGS 滤波器机构的对称性, 有 $M_1 = M_2$. 互感值 M_1, M_2 为

$$M_1 = M_2 = L_1 \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2}, \quad (8)$$

式中 f_e 和 f_m 分别为因互感减少和增加时单个谐振器存储能量的谐振频率点 [19].

$$M_3 = \pm 0.5\sqrt{L_1 L_2} \times \left(\frac{f_{o2}}{f_{o1}} + \frac{f_{o1}}{f_{o2}} \right) \times \sqrt{\left(\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \right)^2 - \left(\frac{f_{o2}^2 - f_{o1}^2}{f_{o2}^2 + f_{o1}^2} \right)^2}, \quad (9)$$

式中 f_1 和 $f_2 (f_2 > f_1)$ 为各自谐振器因耦合产生的谐振频率, 互感系数的正负符号取决于两个环路电流是同向还是反向 [19].

3 互补型 DGS 结构共模滤波器仿真与验证

为了验证提出的互补结构 DGS 共模滤波器的特性, 在 HFSS 仿真平台构建图 1 所示的模型, 它采用两层 PCB 板, 衬底介质材料采用 FR4 板材, 其介电常数为 4.4, PCB 板厚 h 为 0.8 mm; 差分信号线位于 PCB 板顶层, DGS 共模滤波器位于差分线正对的 PCB 低层地平面上; 差分信号线线宽 w 为 1.1 mm, 线间距 S 为 0.8 mm, 该耦合微带线的奇模和偶模阻抗分别为 50 和 66 Ω . DGS 尺寸参数如表 1 所示. 为了验证三个 DGS 之间的互

感对滤波器性能的影响, 在保证三个 DGS 结构不变的情况下, 将相互之间的距离增加 4 mm, 此时 $L_1 = 18$ mm. 图 3 为本文提出的共模 DGS 滤波器以及增加间隔距离的共模 DGS 滤波器对比仿真图.

表 1 互补型宽阻带 DGS 滤波器结构尺寸参数
Table 1. Geometric parameters used in the complementary broad stopband DGS filter.

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
值/mm	10	10	1	4	4
参数	g_1	g_2	g_3	R_1	R_2
值/mm	0.2	0.2	0.2	2.0	2.5

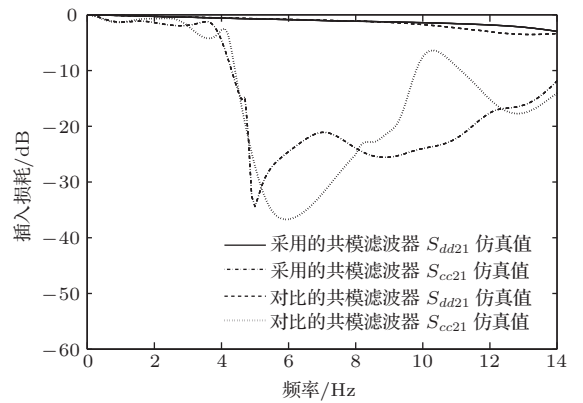


图 3 互补型宽阻带 DGS 滤波器与 DGS 间隙变大的滤波器 S 参数仿真对比

Fig. 3. Comparison of simulated S parameters values between complementary wide stopband DGS filter and increased-space of DGS filter.

对于高速差分信号线, 当共模抑制达 15 dB 时即可满足信号完整性和电磁干扰滤波器需求 [15]. 从图 3 可得, 在共模抑制大于 15 dB 条件下, 互补型宽阻带 DGS 滤波器滤波范围为 4.7—12.4 GHz, 阻带宽度为 7.7 GHz; 而对比 DGS 滤波器的滤波范围为 4.6—9.5 GHz, 阻带宽度为 4.9 GHz. 原因是 DGS 间距增加后, 相互之间的互感变小, 此时滤波效果主要取决于这三个 DGS 自身的滤波能力. 而本文提出的互补型宽阻带 DGS 滤波器的滤波效果除了与这三个 DGS 自身的滤波能力有关外, 还与相互之间的互感有关. 因此可通过合适地设计滤波器结构及尺寸, 利用互感关系有效拓宽滤波范围.

图 4 为按照表 1 设计的实物图, PCB 尺寸为 85 mm \times 70 mm.

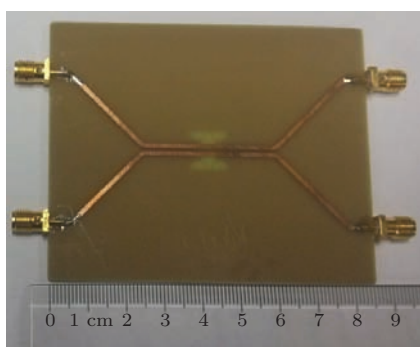


图4 (网刊彩色) 滤波器实物图

Fig. 4. (color online) Top view of proposed prototype filter.

图5给出了本设计的测试结果,基本与HFSS仿真获得的阻带范围及阻带带宽相一致.互补型宽阻带DGS滤波器在共模抑制满足15 dB的条件下仿真的滤波范围为4.7—12.4 GHz,阻带宽度为7.7 GHz,实测范围为4.3—12.0 GHz,阻带宽度为7.7 GHz;互补型宽阻带DGS滤波器在共模抑制满足20 dB条件下仿真的滤波范围为4.8—11.4 GHz,阻带宽度为6.6 GHz,实测范围为4.8—11.8 GHz,阻带宽度为7.0 GHz.其差异与两者差分线走线长度、测试时SMA连接器性能、制造工艺以及FR4自身材料有一定关系,但它仍能反映本文提出的新型结构的有效性.为了进行对比,图5也给出了文献[13]所采用的周期性DGS结构的共模插入损耗 S_{cc21} 仿真值,它在共模抑制满足20 dB的条件下阻带宽度约为4.4 GHz.本文方法所得共模滤波带宽比文献[13]所采用方法宽50%以上.

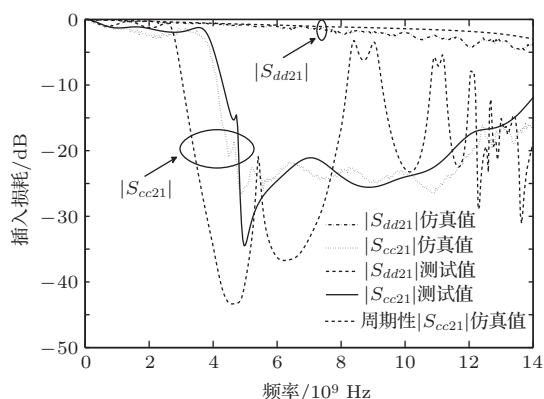


图5 互补结构宽阻带DGS滤波器仿真与测试结果及与周期性DGS滤波器的对比

Fig. 5. Simulated and measured results of the complementary broad stopband DGS filter and comparison of simulated result between periodic DGS and proposed DGS.

4 结 语

差分信号走线已广泛应用于高速通信系统及集成电路系统设计中,然而共模噪声已经成为制约其设计应用的一个难点.传统滤波器难以满足需求,采用低成本和小体积的DGS方案设计共模滤波器已成为研究热点.本文从互补对称结构出发,提出一种紧凑型DGS滤波器,采用该滤波器可以在将共模噪声抑制15 dB的条件下,共模阻带范围达到4.7—12.4 GHz,在将共模噪声抑制20 dB的条件下,共模阻带范围达到4.8—11.4 GHz,同时对差模信号的损伤较小.该滤波器易于在低成本的FR4PCB板上实现.

参考文献

- [1] Al-Hasan M J, Denidni T A, Sebak A R 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 4354
- [2] Elena P, Eva R I, Kildal P S 2012 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **22** 129
- [3] Kim S H, Lee J Y, Nguyen T T, Jang, J H 2013 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **12** 1468
- [4] Jiang D C, Li Y S, Lu J M, Ding T H 2013 *J Electron. Inform. Technol.* **35** 1496 (in Chinese) [蒋冬初, 李玉山, 路建民, 丁同浩 2013 电子与信息学报 **35** 1496]
- [5] Shi L F, Cai C S, Meng C, Cheng L Y 2013 *Chin. J. Radio Sci.* **28** 332 (in Chinese) [史凌峰, 蔡成山, 孟辰, 成立业 2013 电波科学学报 **28** 332]
- [6] Xu H X, Wang G M, Liang J G, Peng Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 074101 (in Chinese) [许河秀, 王光明, 梁建刚, 彭清 2012 物理学报 **61** 074101]
- [7] Gao W D, Liu H, Sun R H 2013 *J. Shanghai Jiaotong Univ.* **47** 1109 (in Chinese) [高卫东, 刘汉, 孙荣辉 2013 上海交通大学学报 **47** 1109]
- [8] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 207301 (in Chinese) [王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 207301]
- [9] Ahn D, Park J S, Kim C S, Kim J, Qian Y X, Itoh T 2001 *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* **49** 86
- [10] Karmakar N, Roy S M, Balbin I 2006 *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* **54** 2160
- [11] Woo D J, Lee T K, Lee J W 2013 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **23** 447
- [12] Liu W T, Tsai C H, Han T W, Wu T L 2008 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **18** 248
- [13] Yang F X, Tang M, Wu L S, Mao J F 2014 *IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symposium Bangalore, India, December 14–16, 2014* p129
- [14] Lee J K, Kim Y S 2010 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **20** 316
- [15] Wu S J, Tsai C H, Wu T L, Itoh T 2009 *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* **57** 848

- [16] Kufa M, Raida Z 2013 *Elect. Lett.* **49** 199
 [17] Pang Y Y, Feng Z H 2012 *Microwave and Millimeter Wave Technology* Shenzhen, China, May 5–8, 2012 p1
 [18] Song Y H, Yang G M, Wen G Y 2014 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **24** 230
 [19] Hong J S G, Lancaster M J 2001 *Microstrip Filter for RF/Microwave Applications* (New York: Wiley) pp248–255

A broad stopband common-mode suppression defected ground structure filter with complementary structure*

Zeng Zhi-Bin^{1)†} Yao Yin-Di²⁾ Zhuang Yi-Qi¹⁾

1) (School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (School of Communication and Information, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(Received 30 November 2014; revised manuscript received 12 March 2015)

Abstract

A low-cost defected ground structure (DGS) wideband stopband filter adopting complementary structure is proposed, which is designed for common-mode noise suppression in high-speed differential signals. The filter is etched below the low cost FR4 printed circuit board. To avoid stimulating the common-mode noise, the DGS cells on ground planes are kept symmetrical to the central line of the two differential signal lines. Both sides of the filter adopt a symmetric cup-shape DGS structure and the middle of the filter adopts a symmetric umbrella-type structure. All of the DGS structures are complementary, which makes the filter compact and miniaturized. What is more, because the spaces among the three DGS are closer, there exist the mutual inductances among them, which are utilized to achieve a wide stopband filter. The simulated result demonstrates the proposed filter has a wideband bandwidth of 6.8 GHz over 20 dB. In order to analyze the effect of compact structure of the filter, a filter having the same DGS patterns but large spaces among them is compared with it. The simulated result demonstrates that the stopband bandwidth of the compared filter has a wideband bandwidth of 4.4 GHz over 20 dB, of which the bandwidth is about 2.4 GHz less than that of the proposed filter. It is obvious that there exists a mutual inductance in the compact DGS structure common-mode filter, which plays an important role in broadening the bandwidth of the proposed filter. In order to facilitate analysis, an equivalent model of LC circuit is also given. The equivalent parameters of LC can be deduced from the definition of 3 dB cut-off frequency and resonant frequency, of which the values can be obtained by the HFSS simulation. The simulated and measured results show that the differential signal under the DGS filter is nearly intact, and the common-mode noise can be reduced over 20 dB from 4.6 GHz to 11.4 GHz and over 15 dB from 4.3 GHz to 12 GHz, while the area of the filter is only 10 mm by 10 mm. Compared with the periodic DGS at the same suppression depth of common-mode noise over 20 dB, the method has the advantages that surface area is reduced to no more than 30%, and the stopband width is increased by over 50%.

Keywords: stopband filter, defected ground structure, common-mode, complementary structure

PACS: 41.20.Jb, 84.40.Dc, 84.32.-y

DOI: 10.7498/aps.64.164101

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2012ZX03001018-001) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. JB151109).

† Corresponding author. E-mail: zbzeng@163.com