

抑制同步开关噪声的新颖电磁带隙结构

路宏敏¹, 余志勇², 谭康伯¹, 王向荣¹

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 710071, 西安; 2. 第二炮兵工程大学科研部, 710025, 西安)

摘要: 为了抑制印刷电路板的同步开关噪声(SSN),提出了一种新型二维电磁带隙结构. 基于金属折线增强相邻单位晶格间的电感,采用折线与含有缝隙的正方形金属贴片桥接构建单位晶格,实现新型电磁带隙结构设计. 应用 HFSS 软件仿真分析电磁带隙结构,结果表明:与相同参数的 L 形桥接电磁带隙结构比较,抑制深度为 -30 dB 时,阻带带宽为 0.45~5.3 GHz,相对带宽提高了约 15%,阻带下限截止频率下降了 150 MHz. 测量结果与仿真结果吻合,能够全向抑制电源平面上的 SSN,同时采用差分线对传输信号时,对信号完整性造成的影响较小.

关键词: 印刷电路板;同步开关噪声;电磁带隙;电磁兼容

中图分类号: TN41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0017-06

A Novel Electromagnetic Band-Gap Structure for Noise Suppression of Simultaneous Switching

LU Hongmin¹, YU Zhiyong², TAN Kangbo¹, WANG Xiangrong¹

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Institute of Scientific Research Ministry, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: A novel planar electromagnetic band-gap (EBG) structure is proposed to suppress the simultaneous switching noise (SSN) within the power/ground planes of the printed circuit boards. The novel design bases on the facts that meander lines increase the effective inductance of EBG patches, and that the unit cell of the EBG power plane consists of one square patch with the slots and four meander line bridges. The proposed design is validated by HFSS numerically, and comparisons with the L-bridged EBG of the same parameters, under the conditions with the -30 dB suppression and bandwidth ranging from 0.45 GHz to 5.3 GHz show that the lower cut-off frequency is decreased by 150 MHz, and the relative bandwidth is increased by about 15%. The proposed EBG power plane is fabricated and measured, and good agreement between the simulated and measured results is found along with the omni-directional suppression of the SSN. It is also found that good signal integrity performance can be obtained when differential transmission lines are used.

Keywords: printed circuit board; simultaneous switching noise; electromagnetic band-gap; electromagnetic compatibility

随着快速边沿速率、高时钟频率和低电压电平的现代高速数字电路需求的日益增加,同步开关噪声(simultaneous switching noise,SSN)已经成为制

约现代高速、高性能数字系统应用的主要瓶颈^[1]. SSN 不仅降低了数字电路的噪声容限,而且也降低了混合信号系统中模拟电路的性能. 当许多有源器

件同时开关时,所产生的开关噪声能够引起电源分配系统的波动,导致信号完整性降低和电磁干扰问题^[2]. 过去 10 年间,人们广泛讨论 SSN 问题,采取不同的传统方法,诸如电源与地平面间接接分立电容器、应用差分互连电路、选择过孔位置等以减轻同步开关噪声^[3]. 去耦电容器一般应用于降低电源平面或者地平面阻抗,从而减小 SSN 电压,然而与电容器有效串联电感相关的电容器自谐振效应限制了这一技术的频率带宽,因为这些电容器通常在高于 600 MHz 频率应用时无效^[4]. 由于电容器的自谐振频率通常低于几百 MHz,而典型的 SSN 具有低于 6 GHz 的低通频谱,因此采用去耦电容器的旁路技术不能解决高频 SSN 问题.

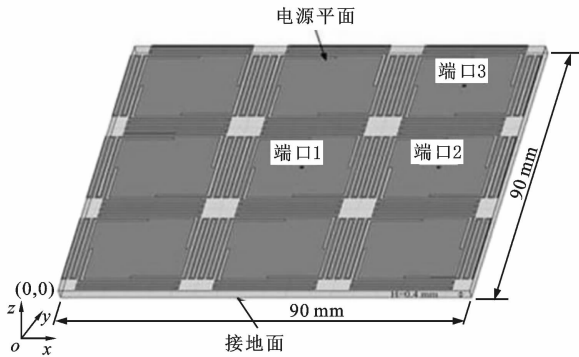
近年来,电磁带隙 (electromagnetic band-gap, EBG) 结构或者光子带隙 (photonic band-gap, PBG) 结构构建的高阻抗表面 (high impedance surface, HIS) 已成为抑制去耦电容器没有覆盖的高频 SSN 的新方法. 一些蘑菇型 EBG 结构^[3,5-6] 和平面型 EBG 结构^[7-11] 被提出,以抑制封装或 PCB 衬底上的腔体谐振模和噪声信号传播^[4]. 蘑菇型 EBG 结构的基本构件是电源平面与地平面间特别设计的通孔及附加的平面间金属贴片,而平面型 EBG 结构的基本构件是嵌入电源平面的金属贴片和桥接. 与蘑菇型 EBG 结构比较,平面型 EBG 结构易于采用标准 PCB 技术设计和制作. 具有平面 EBG 结构的 L 型桥接 EBG 电源平面,提供了覆盖 600 MHz 到 4.6 GHz 的 SSN 抑制特性,阻带带宽 4 GHz^[7]; 混合型平面 EBG 结构旨在减小 EBG 结构的截止频率,扩展阻带带宽^[9]; 级联低频与高频单位晶格构建的 EBG 结构可以实现超宽带 SSN 抑制^[10].

本文提出了一种应用于 PCB 电源平面的新颖二维 EBG 结构,其单位晶格由折线缝隙组合与正方形金属贴片桥接构成. 这一新颖 EBG 结构的性能优于传统 L 型桥接 EBG 结构,且采用现有常规 PCB 制造工艺就能够实现.

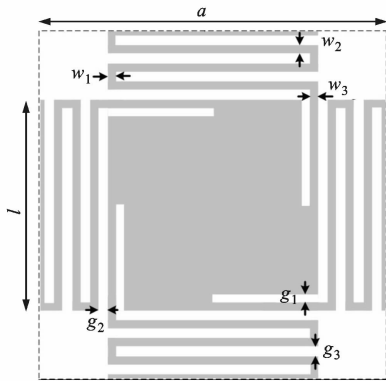
1 折线-缝隙电磁带隙电源平面设计

高速数字电路中,电源平面或地平面被嵌入多层 PCB 中. 依信号完整性的观点,必须保持电源平面和地平面连续,以提供直流电流,同时必须保持电源平面或地平面是高阻抗表面,以滤除交流噪声^[1,4]. 图 1a 为本文提出的具有新颖电磁带隙结构的电源平面,地平面是连续实心导电平面,应用于双层 PCB. 为了方便与以前的研究结果比较,应用

HFSS 软件作仿真分析,选择双层 PCB 的尺寸为 90 mm×90 mm×0.4 mm,衬底介质材料为 FR4,其相对介电常数 $\epsilon_r=4.4$,损耗角正切 $\tan\delta=0.02$. 蚀刻一个 3×3 矩形单位晶格阵列的 EBG 结构,嵌入电源平面,对应单位晶格的相关尺寸标注见图 1b. 矩形单位晶格的长度 $a=30$ mm,折线宽度 $w_1=w_2=w_3=0.2$ mm,折线长度 $l=27$ mm,缝隙宽度 $g_1=g_2=g_3=0.2$ mm.



(a) 三维视图及端口位置



(b) 正方形单位晶格的参数

图 1 3×3 单位晶格的 EBG 结构电源平面

嵌入 EBG 结构的电源平面与地面对的基本原理是滤除电源平面的 SSN 和其他噪声传播,为电源平面和地平面上的直流电流提供低阻抗通路. 周期性 EBG 结构的每个单位晶格尺寸只要比其上传播的信号波长小得多,EBG 单位晶格就能够建模为并联 LC 滤波器,其中 L 和 C 为 EBG 结构金属贴片电感和电容. EBG 结构的阻带中心频率可以半定量地表示为 $f_0=1/[2\pi(LC)^{1/2}]$,而相对带宽正比于 $(L/C)^{1/2}$ ^[3]. 两个相邻单位晶格间的带隙引入边缘电容,连接相邻单位晶格的桥实际上是一个电感^[7]. 可见,只要设计一种新的 EBG 结构,使其周期性电磁带隙结构的每个单位晶格的电感增加,而电容变化相对较小且维持一个相对大的 $(L/C)^{1/2}$ 值,

那么就有可能提高电磁带隙结构抑制 SSN 的能力,并降低截止频率,扩展阻带带宽. 因此,与以前的 L 形桥接(L-shaped bridge)EBG 结构比较^[7],本文提出的新 EBG 结构的关键特色是折线(meander line)桥接和金属贴片上蚀刻缝隙(slot),以增强相邻金属贴片间的电感. 基于此,本文将具有新颖 EBG 结构的 PCB 电源平面称为折线-缝隙电磁带隙(MS-EBG)电源平面.

2 宽带 SSN 抑制

为了度量 MS-EBG 电源平面的传输特性(插入损耗),即抑制 SSN 的能力,本文采用基于有限元方法的 HFSS 软件进行数值分析. 在数值仿真中,PCB 上设置的 3 个测试端口的直角坐标原点位于该图的左下方,输入端口 1、输出端口 2 和输出端口 3 分别依次位于(45 mm,45 mm)、(75 mm,45 mm)和(75 mm,75 mm),如图 1a 所示,由置于输入端口 1 的集总源采用 50 Ω 标准同轴线激励.

一般而论,双层 PCB 的电源平面若为实心连续金属面时常被称为参考电源平面,具有周期性 EBG 结构的电源平面则被称为 EBG 电源平面. 本文引用的嵌入蚀刻 L 形桥接(L-shaped bridge)EBG 结构的 PCB 电源平面为 L-bridged EBG 电源平面^[7],而嵌入 MS-EBG 结构的电源平面为 MS-EBG 电源平面. 对相同参数的参考电源平面、L-bridged EBG 电源平面和 MS-EBG 电源平面的传输特性 S_{21} (端口 1 ~ 端口 2 的传输特性)进行仿真实验比较,结果如图 2 所示. 图 2 表明,L-bridged EBG 电源平面和 MS-EBG 电源平面的 SSN 抑制特性显著优于参考电源平面. 以 S_{21} 幅度小于 -30 dB 定义阻带,则阻带带宽完全由下限截止频率 f_L 、上限截止频率 f_U 和中心频率 f_c 确定,中心频率和相对阻带带宽分别由式(1)和式(2)给出

$$f_c = \frac{f_U + f_L}{2} \tag{1}$$

$$W_B = \frac{f_U - f_L}{f_c} \times 100\% \tag{2}$$

从图 2 给出的 MS-EBG 电源平面与相同参数的 L-bridged EBG 电源平面的传输特性 S_{21} 的仿真结果可见,-30 dB 以下,MS-EBG 电源平面的阻带覆盖 0.45 GHz 到 5.3 GHz,带宽为 4.85 GHz,而 L-bridged EBG 电源平面的阻带覆盖 0.6 GHz 到 4.6 GHz,带宽为 4.0 GHz^[7]. 与 L-bridged EBG 电源平面的插入损耗特性比较,MS-EBG 电源平面在

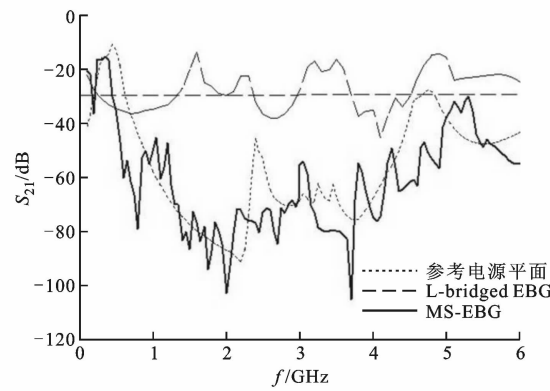


图 2 3 种不同电源平面的 S_{21} 特性比较

-30 dB 阻带的下限截止频率 f_L 下降了 150 MHz,阻带带宽由 4.0 GHz 增加为 4.85 GHz,相对阻带带宽由 154%增强为 169%(增加了 15%). 仿真结果表明,MS-EBG 电源平面的 SSN 抑制特性优于 L-bridged EBG 电源平面.

对 3 种不同电源平面的 S_{31} (端口 1 ~ 端口 3 的传输特性)特性进行了仿真比较,结果如图 3 所示. 从图 3 中同样能够观察到 MS-EBG 电源平面的 SSN 抑制特性优于 L-bridged EBG 电源平面和参考电源平面.

图 4 表示同一噪声激励端口(端口 1)、不同接

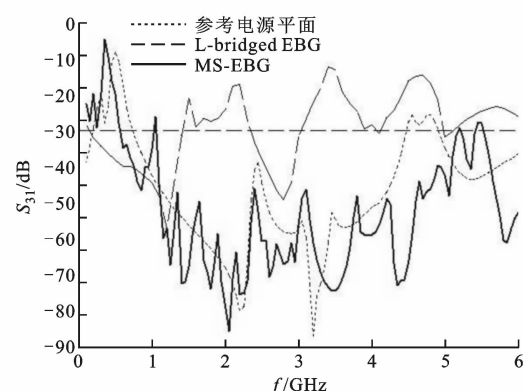


图 3 3 种不同电源平面的 S_{31} 特性比较

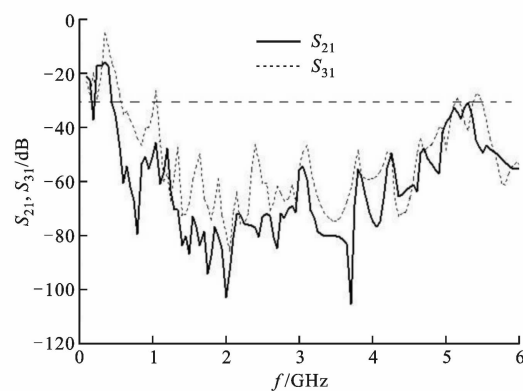


图 4 不同端口的 SSN 抑制特性

收端口(端口 2、端口 3)的 MS-EBG 电源平面的 SSN 抑制特性. 可以看出,抑制深度为 -30 dB 时, MS-EBG 电源平面 S_{31} 的阻带带宽从 0.55 GHz 延伸到 5.2 GHz ,而 S_{21} 的阻带宽度从 0.45 GHz 延伸到 5.3 GHz , S_{21} 和 S_{31} 的阻带带宽基本一致,这意味着 MS-EBG 电源平面能够全向抑制 SSN.

为了进一步验证新型 MS-EBG 电源平面的 SSN 抑制特性,基于能够实现的 PCB,除 MS-EBG 电源平面与地平面间距由 0.4 mm 改变为 0.5 mm 外,委托某研究所制作了一块与仿真模型参数相同的 MS-EBG 电源平面双层 PCB,如图 5 所示. 采用型号 N5230a 的安捷伦矢量网络分析仪和端口 $50\text{ }\Omega$ 的 SMA 接头同轴激励,测量嵌入 MS-EBG 的双层 PCB 电源平面的传输特性. 同时,建立与实测 MS-EBG 电源平面双层 PCB 参数相同的仿真模型,获取仿真结果,MS-EBG 电源平面 SSN 抑制特性的测量结果与仿真结果如图 6 所示.

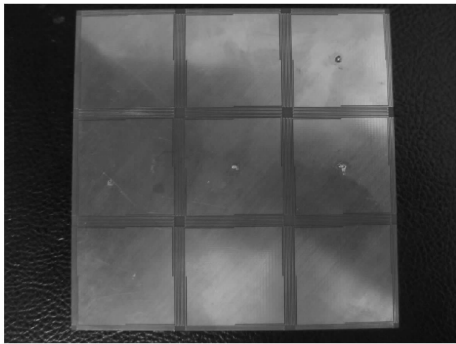
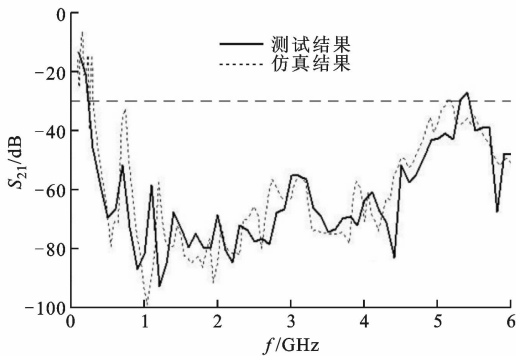


图 5 含有 MS-EBG 电源平面的双层 PCB 板

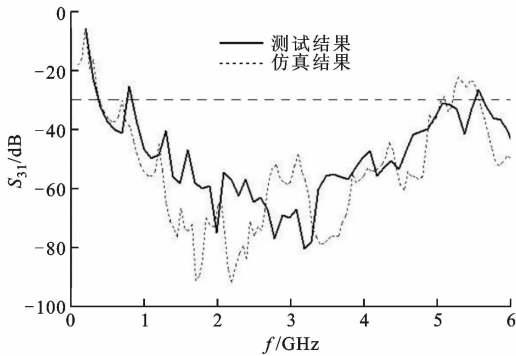
图 6 结果表明:抑制深度为 -30 dB 时, S_{21} 的带隙宽度覆盖 240 MHz 到 5.2 GHz 的频带,带宽 4.96 GHz ; S_{21} 的带隙宽度覆盖 320 MHz 到 5.1 GHz 的频带,带宽 4.78 GHz . 从图 6 可以看出,测量结果与仿真结果吻合,MS-EBG 电源平面具有良好的宽带 SSN 抑制特性.

3 MS-EBG 电源平面的信号完整性

尽管新型 MS-EBG 结构表现出对 SSN 的超宽带抑制效果,但破坏了电源平面的完整性^[12]. 为了分析 MS-EBG 电源平面对信号完整性的影响,本文设计了一个 4 层 PCB 板,PCB 板的侧视图和立体图如图 7 所示. PCB 的中间两层分别是 MS-EBG 电源层和地层,顶层和底层均为信号层. 信号沿传输线从顶层信号层通过通孔传输到底层信号层,然后又通过通孔回到顶层信号层. 其中,传输线的线宽设置为

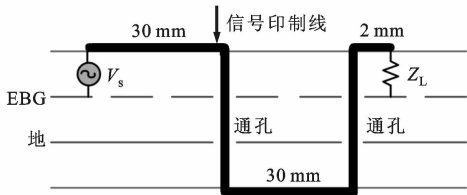


(a) S_{21} 幅值对比

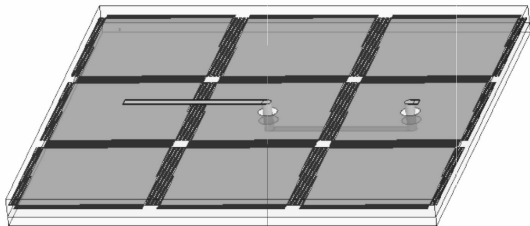


(b) S_{31} 幅值对比

图 6 MS-EBG 电源平面 SSN 抑制特性的测量与仿真结果



(a)侧视图



(b)立体图

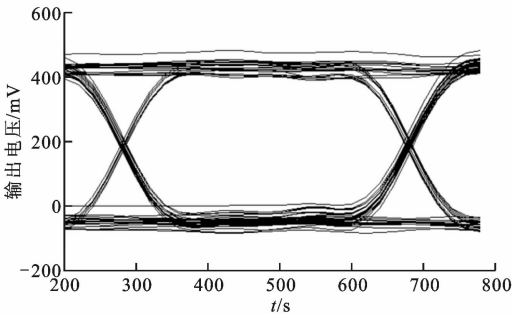
图 7 装载传输线的 4 层 PCB 板的侧视图和立体图

1 mm ,阻抗为 $50\text{ }\Omega$.

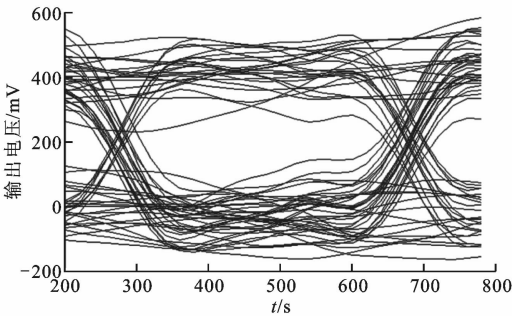
应用 Ansoft Designer 软件仿真分析,端口 1 处加伪随机二进位序列源 V_s ,在端口 2 处观察信号传输特性. 仿真频率设置为 2.5 GHz ,逻辑为 0 和 1 的电位值分别为 0 mV 和 500 mV ,上升/下降时间为

120 ps,完整电源平面和 MS-EBG 电源平面的眼图仿真结果如图 8 所示。

衡量眼图质量的最主要的 2 个参数分别是最大眼睛张开(maximum eye open, MEO)度(V_{MEO})和最大眼睛宽(maximum eye width, MEW)度(W_{MEW})。图 8 表明:对于完整电源平面, $V_{MEO}=415\text{ mV}$, $W_{MEW}=380\text{ ps}$;对于 MS-EBG 电源平面, $V_{MEO}=252\text{ mV}$, $W_{MEW}=361\text{ ps}$ 。与完整电源平面比较,MS-EBG 电源平面对信号完整性影响较大。相对于完整电源平面,刻蚀 EBG 结构的 MS-EBG 电源平面,其电源平面的完整性被破坏,从而导致高速信号传输路径上特性阻抗不连续,降低了传输线上高速数字信号传输质量。此外,该系统传输的高速数字信号的高频分量还可能产生电磁辐射,电源平面的不连续性使得信号传输回路的噪声抗扰度降低,容易遭受周围 EMI 耦合。综上所述,刻蚀 EBG 结构的电源平面相对于参照平面(完整电源平面)不具备完整性,从而引发阻抗突变以及噪声增大等问题,致使眼图变模糊,表征出信号完整性有较大的降低。



(a)完整电源平面板



(b)EBG 电源平面板

图 8 装载单传输线的眼图

运用差分线对可以改善 MS-EBG 电源平面对其信号完整性的影响。设计一个装载 100 Ω 差分线对的 4 层 MS-EBG 电源平面 PCB 板,差分线线宽 0.5 mm,线间距 0.25 mm,如图 9 所示。应用 An-

soft Designer 软件仿真分析的眼图,如图 10 所示。图 10 结果显示: $V_{MEO}=390\text{ mV}$, $W_{MEW}=373\text{ ps}$;与完整电源平面比较,MS-EBG 电源平面对信号完整性影响较大,其幅度比 V_{MEO} 为 6%, W_{MEW} 为 1.8%。因此,采用差分线对传输信号时,MS-EBG 电源平面具有良好的宽带 SSN 抑制能力,同时对信号完整性造成的影响较小。

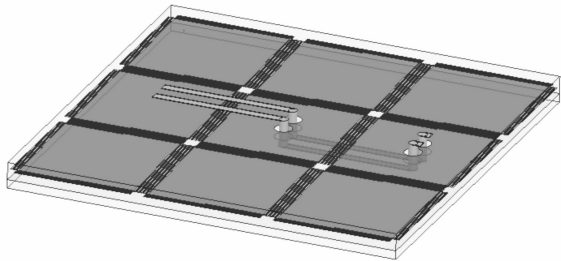


图 9 装载差分线对的 MS-EBG PCB 立体图

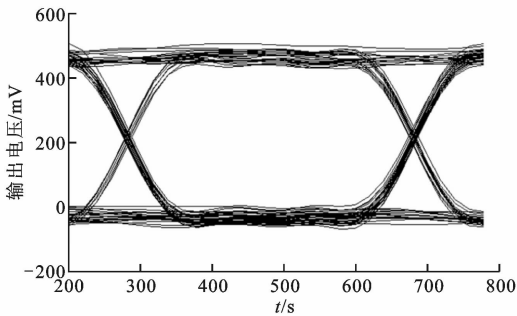


图 10 装载差分线对的 MS-EBG PCB 眼图

4 结 论

为了增强相邻单位晶格间电感实现宽带 SSN 抑制,提出了一种折线与含有缝隙的正方形金属贴片桥接构成的新型电磁带隙结构——MS-EBG 结构。对嵌入 3 $\times$ 3 MS-EBG 单位晶格的 PCB 电源平面的仿真结果表明,与相同参数的 L-bridged EBG 结构比较,抑制深度为 -30 dB 时,MS-EBG 电源平面的阻带带宽覆盖 0.45 GHz 到 5.3 GHz 的频带范围,相对带宽提高了约 15%,阻带下限截止频率下降了 150 MHz。MS-EBG 电源平面的 SSN 抑制特性的测量结果与仿真结果吻合,能够全向抑制电源平面上的 SSN。采用差分线对传输信号时,MS-EBG 电源平面对信号完整性造成的影响较小。

参考文献:

[1] SWAMINATHAN M, KIM J, NOVAK I, et al. Power distribution networks for system-on-package: status and challenges [J]. IEEE Transactions on Ad-

- vanced Packaging, 2004, 27(2): 286-300.
- [2] VAN DER BERGHE S, OLYSLAGER F, DE ZUTTER D, et al. Study of the ground bounce caused by power plane resonances [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(2): 111-119.
 - [3] ABHARI R, ELEFTHERIADES G V. Metallo-dielectric electromagnetic band-gap structures for suppression and isolation of the parallel-plate noise in high-speed circuits [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(6): 1629-1639.
 - [4] SIEVENPIPER D, ZHANG Lijun, JIMENEZ B R F. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2059-2074.
 - [5] SHAHPARNIA S, RAMAHI O M. Electromagnetic interference (EMI) reduction from printed circuit boards (PCB) using electromagnetic bandgap structures [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(4): 580-587.
 - [6] KAMGAING T, RAMAHI O M. A novel power plane with integrated simultaneous switching noise mitigation capability using high impedance surface [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2003, 13(1): 21-23.
 - [7] WU Tzong-Lin, LIN Yen-Lin, CHEN S T. A novel power planes with super-wideband elimination of ground bounce noise on high speed Circuits [J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2005, 15(3): 174-176.
 - [8] 路宏敏, 余志勇, 赵益民, 等. 一种具有新颖电磁带隙结构的印刷电路板电源平面[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(3): 20-23.
LU Hongmin, YU Zhiyong, ZHAO Yimin, et al. Power plan of the printed circuit board with novel electromagnetic band-gap structures [J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(3): 20-23.
 - [9] KIM K H, SCHUTT-AINE J E. Analysis and modeling of hybrid planar-type electromagnetic-bandgap structures and feasibility study on power distribution network applications [J]. IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(1): 178-186.
 - [10] RAO P H. Hybrid electromagnetic bandgap power plane for ultra-wideband noise suppression [J]. Electronics Letters, 2009, 45(19): 981-982.
 - [11] WU Tzong-Lin, WANG Ting-Kuang. Embedded power plane with ultra-wideband stop-band for simultaneously switching noise on high-speed circuits [J]. Electronics Letters, 2006, 42(4): 213-214.
 - [12] 丁同浩, 李玉山, 张伟, 等. 电磁带隙结构的信号完整性分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1267-1270.
DING Tonghao, LI Yushan, ZHANG Wei, et al. The signal integrity analysis of electromagnetic band-gap structure [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1267-1270.

[本刊相关文献链接]

- 路宏敏, 安晋元, 赵益民, 等. 印制线拐角的频域分析. 2007, 41(12): 1451-1454.
- 翟小社, 王建华, 宋政湘, 等. 信号完整性分析中时域宏模型结合电路仿真的方法研究. 2007, 41(6): 631-635.
- 张爱民, 张蕾, 张杭, 等. 电子设备电磁敏感性仿真分析及优化设计方法. 2010, 44(8): 5-9.
- 孟国栋, 成永红, 酉小广, 等. 脉冲方波作用下印制电路板互连系统的击穿特性. 2012, 46(4): 58-63.
- 刘金华, 陈贵灿, 张鸿. 采用冲激敏感函数的差分 LC 振荡器相位噪声分析. 2010, 44(12): 66-70.
- 马晓龙, 陈贵灿. 固定位宽乘法器的量化误差补偿方法及电路实现. 2011, 45(12): 75-81.
- 韩海涛, 曹建福, 马红光, 等. 非线性输出频域响应函数的自适应辨识算法及应用. 2011, 45(10): 77-81.
- 刘晔, 张璐, 杨新伟, 等. 采用硬件神经电路的压力传感器零点温漂补偿研究. 2010, 44(8): 10-14.
- 黎大健, 杨景刚, 梁基重, 等. 气体绝缘开关内自由运动金属颗粒的超声波信号特性. 2009, 43(2): 101-105.
- 戚建辉, 王小力, 王守军. 移动数字电视调谐器中低噪声模拟滤波器的设计. 2009, 43(2): 72-76.
- 王润新, 刘进军, 侯丹. 用于实现互联系统仿真的电源模块大信号模型. 2009, 43(6): 76-81.
- 牛博, 宋政湘, 王建华, 等. 继电保护装置信号端口电磁干扰传播通道的建模与仿真. 2009, 43(10): 104-108.
- 杨骁, 陈贵灿, 程军, 等. 一种新型级联 Δ 调制器系统结构. 2008, 42(12): 1541-1545.
- 杨骁, 陈贵灿, 程军, 等. 一种新型高阶两通道时间交织 $\Sigma\Delta$ 调制器系统结构. 2008, 42(8): 996-1000.
- 张鸿, 陈贵灿, 程军, 等. 流水线模数转换器中高速低功耗开环余量放大器的设计. 2008, 42(6): 751-755.
- 胡晓菁, 宋政湘, 王建华, 等. 运用电路蕴涵及拓扑信息提高数字电路故障压缩效率. 2008, 42(8): 958-962.
- 陈景亮, 姚学玲, 孙伟. 基于表面闪存放电的伪火花开关触发特性的研究. 2007, 41(8): 978-981.
- 赵剑, 贾建援, 王洪喜, 等. 屈曲式微加速度开关设计与分析. 2007, 41(3): 358-361.

(编辑 刘杨)