

## 一种适用于同步开关噪声抑制的共面电磁带隙新结构

陈朋\* 汝岩 廖立科  
(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

**摘要:** 该文根据电磁带隙结构的带隙形成机理及共面电磁带隙结构等效电路分析模型, 通过引入新型的 C-型桥连接线及开槽设计, 提出了一种适用于高速电路同步开关噪声(SSN)抑制的带有狭缝的共面 C-型桥电磁带隙(CBS-EBG)结构。实测结果表明, 在抑制深度为 $-40$  dB时, 阻带范围为 $296$  MHz~ $15$  GHz, 与LBS-EBG结构相比, 在保持高频段SSN抑制性能的同时, 阻带下限截止频率由 $432$  MHz下降至 $296$  MHz, 有效降低了带隙中心频率。研究了局部拓扑下的信号传输特性, 结果表明, 当采用局部拓扑并选择合适的走线策略时, 该结构在保持良好的SSN抑制性能的同时, 能够实现较好的信号完整性。

**关键词:** 电磁带隙; 信号完整性; 电源完整性; 同步开关噪声; 阻带

中图分类号: TN811

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)11-2775-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01987

## A Novel Planar Electromagnetic Band-Gap Structure for SSN Suppression

Chen Peng Ru Yan Liao Li-ke

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** According to the physical mechanism and the equivalent circuit model of the planar Electromagnetic Band-Gap (EBG) structure, a novel planar EBG structure named CBS-EBG for Simultaneous Switching Noise (SSN) suppression in high-speed circuits is proposed by introducing the special C-shaped Bridges and Slits (CBS). Real-data experiment shows that  $-40$  dB stopband is realized from  $296$  MHz~ $15$  GHz. Compared with the LBS-EBG structure, the lower cutoff frequency decreases from  $432$  MHz to  $296$  MHz with a similar higher frequency range performance, and a lower band-gap center frequency is realized. The transfer characteristic of the signal under localized CBS-EBG is studied. Simulation and measurement are performed to verify the high performance of the proposed CBS-EBG both in SSN suppression and signal integrity with the local topology and appropriate routing policy.

**Key words:** Electromagnetic Band-Gap (EBG); Signal Integrity (SI); Power Integrity (PI); Simultaneous Switching Noise (SSN); Stop-band

### 1 引言

随着电子系统向着高速度、高密度、高功耗、低电压和大电流的趋势发展, 系统中大量高速开关器件同时进行状态切换时, 会引起严重的同步开关噪声(Simultaneous Switching Noise, SSN)。这些噪声耦合至印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)的电源、地平面构成的平行板波导中, 将激起平面谐振, 导致严重的电源完整性(Power Integrity, PI)问题, 并最终引发信号完整性(Signal Integrity, SI)及电磁干扰(Electro-Magnetic Interference, EMI)等问题, 影响电子系统的稳定性, 甚至导致系统无法

正常工作。如何有效地抑制SSN成为目前高速电路电源分配网络(Power Distribution Network, PDN)设计研究的重点<sup>[1]</sup>。

早期的研究工作中提出了许多抑制SSN的方法, 主要包括使用分立式去耦电容<sup>[2]</sup>、嵌入式电容<sup>[3]</sup>及电源层分割<sup>[4]</sup>等, 但是这些方法都存在一定的不足: 由于寄生电感的存在, 去耦电容只适用于 $600$  MHz以下的频段; 嵌入式电容需要额外的PCB层, 导致PCB制造成本攀升且阻带宽度有限; 电源层分割破坏平面连续性, 容易引起信号完整性问题。

电磁带隙(Electromagnetic Band-Gap, EBG)结构中周期性的高阻平面可以有效地抑制SSN的传播, 针对应用EBG结构抑制SSN的研究已经取得了丰富的成果, 例如文献[5]提出的L-型桥结构、文献[6]提出的LBS结构、文献[7]提出的S-型桥结构、

2013-12-23 收到, 2014-03-12 改回

国家自然科学基金(61303139)资助课题

\*通信作者: 陈朋 chenpeng@zjut.edu.cn

文献[8]提出的 C-EBG、文献[9]提出的 TIDC 结构及文献[10-12]提出的一些垂直结构。然而, TIDC 结构及垂直 EBG 结构需要额外的 PCB 层, 传统的共面 EBG 结构阻带宽度往往较低且低频段 SSN 抑制性能略有不足。对此, 本文提出了一种适用于高速电路 SSN 抑制的带有狭缝的 C-型桥电磁带隙 (C-shaped Bridges with Slits EBG, CBS-EBG) 结构, 该结构的主要特点在于其特殊的 C-型桥接连线设计及开槽设计。本文后面部分主要包括以下内容: 首先通过共面 EBG 结构的带隙形成机理及共面 EBG 结构 1 维等效电路分析模型, 探讨改善 EBG 结构性能的思路; 然后, 通过引入新的 C-型桥接连线及开槽设计, 提出 CBS-EBG 结构; 建立了仿真分析模型并制作了相应的 PCB, 通过仿真及实验测量验证了 CBS-EBG 结构在全局范围内的 SSN 抑制性能; 通过使用局部拓扑及适当的走线策略, 阐明了局部拓扑结构下, CBS-EBG 能够在保持高效的 SSN 抑制能力的同时, 实现较好的信号完整性; 最终, 给出了本文研究的结论。

## 2 原理分析与设计思想

### 2.1 EBG 结构带隙形成机理

EBG 结构的带隙形成机理分为两种<sup>[3]</sup>: 一种是 Bragg 散射机理, 另一种是局域谐振机理。在局域谐振型 EBG 结构中, 金属贴片之间通过特殊的连接关系, 形成局域电容与电感的谐振单元, 利用结构单元在谐振效应下的高阻特性, 阻止谐振频率附近表面波的传播, 从而形成频率带隙。共面 EBG 结构是局域谐振机理 EBG 的主要结构之一。

### 2.2 共面 EBG 结构等效电路分析

共面 EBG 结构中, 金属贴片可以等效为旁路电容和电感, 桥接连线可以等效为串联电感。将金属贴片等效为两个  $\Pi$ -型 LC 电路级联结构, 得到如图 1 所示的共面 EBG 结构单元 1 维等效电路模型, 其中,  $L_b$  为桥接连线的等效电感,  $L_{p1}$  为金属贴片单元的等效电感,  $C_{p1}$  和  $C_{p2}$  为金属贴片单元的等效电容, 且有  $C_{p1} = 2C_{p2}$ , 因此, 共面 EBG 结构具有低通滤波特性。在该模型下, 共面 EBG 结构的下限截止频率  $f_L$  和上限截止频率  $f_H$  可分别由式(1)和式(2)得到<sup>[1]</sup>。

$$f_L = 1/(2\pi)\sqrt{2/[(C_{p1} + 2C_{p2})L_b]} \quad (1)$$

$$f_H = 1/(2\pi)\sqrt{1/(C_{p2}L_{p1})} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知, 在金属贴片等效电容  $C_{p1}$  和  $C_{p2}$  一定时, 可通过增大桥接连线的等效电感  $L_b$  降低  $f_L$ , 通过减小金属贴片单元的等效电感  $L_{p1}$  提高  $f_H$ 。通过改变金属贴片的等效电容  $C_{p1}$  和  $C_{p2}$  同样可

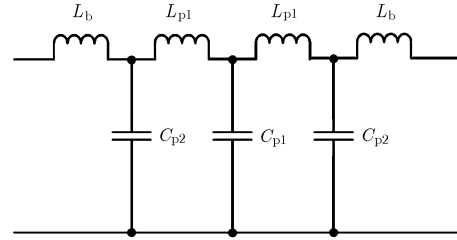


图 1 共面 EBG 结构单元 1 维等效电路模型

以改变  $f_L$  和  $f_H$ , 但是减小金属贴片等效电容将削弱 EBG 结构对 SSN 的抑制能力<sup>[4]</sup>。为了保证对 SSN 的抑制性能, 在实际设计中, 通过适当的桥接连线设计增大桥的等效电感  $L_b$  及减小金属贴片的面积降低等效电感  $L_{p1}$ , 可满足在保持抑制深度的同时扩展阻带宽度的要求<sup>[14,15]</sup>。

## 3 CBS-EBG 结构设计及 SSN 性能分析

### 3.1 结构设计及 SSN 抑制仿真分析

本文提出了一种带有狭缝的 C-型桥电磁带隙 (C-shaped Bridges with Slits EBG, CBS-EBG) 结构, 其结构单元形状及相应尺寸参数定义如图 2 所示。参数值分别为:  $a = 30 \text{ mm}$ ,  $g_1 = g_2 = 0.2 \text{ mm}$ ,  $g_3 = 1.0 \text{ mm}$ ,  $g_4 = 0.35 \text{ mm}$ ,  $w_1 = w_2 = 0.2 \text{ mm}$ ,  $s_1 = 5.7 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 12.1 \text{ mm}$ 。本设计一方面通过新型的 C-型桥接连线增加金属贴片单元间的等效电感, 同时使用嵌入到金属贴片内的狭缝改变电流路径, 从而增强该结构抑制 SSN 的能力。

为了说明 CBS-EBG 结构对 SSN 的抑制性能, 使用 CBS-EBG 结构单元设计了两层 PCB 仿真模型, 其中, 相邻两个 CBS-EBG 结构单元之间的连接示意图如图 3 所示, 两层 PCB 结构模型的示意图如图 4 所示。模型的电源层由  $3 \times 5$  的 CBS-EBG 结构单元组成, 地层保持完整, 模型尺寸为  $90 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 层间填充介质为 FR-4, 介电常数为 4.4, 损耗正切值为 0.02, 介质厚度为  $0.8 \text{ mm}$ , 铜箔厚度为  $0.035 \text{ mm}$ 。在电源平面上的  $(15 \text{ mm}, 45 \text{ mm})$ ,  $(75 \text{ mm}, 75 \text{ mm})$  和  $(135 \text{ mm}, 45 \text{ mm})$  处分别添加  $50 \Omega$  集总同轴端口, 其中端口 1 为输入端口, 模拟噪声源, 端口 2 和端口 3 为输出端口, 模拟噪声敏感电路。同时, 为了便于对比分析, 制作了相应的 LBS-EBG 结构模型及完整电源平面模型, 其中, 模型尺寸、层叠参数、介质参数及端口设置等与 CBS-EBG 结构模型的相同, LBS-EBG 结构单元尺寸参数设置与文献[6]所述保持一致。

CBS-EBG 结构矩阵、LBS-EBG 结构矩阵及完整平面分别作为电源层时模型端口 1 到端口 2 的传

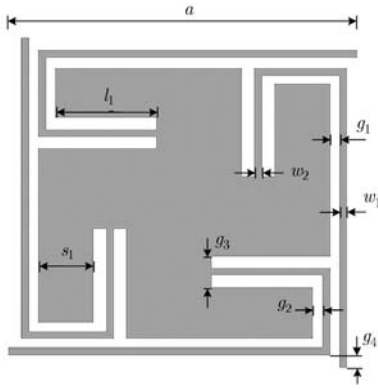


图 2 CBS-EBG 单元结构及参数定义

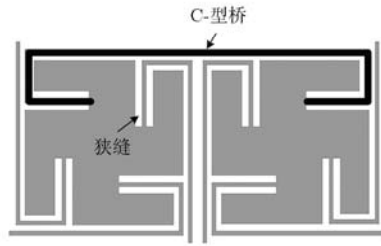


图 3 相邻两个 CBS-EBG 结构单元的连接示意图

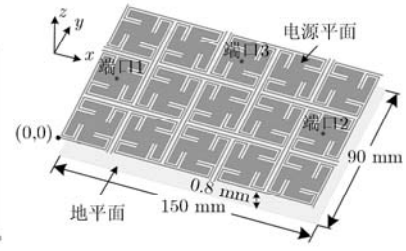


图 4 CBS-EBG 电源地平面结构示意图

输参数仿真结果对比如图 5 所示。仿真结果显示，在抑制深度为  $-40$  dB 时，CBS-EBG 结构的阻带范围为  $294$  MHz~ $15$  GHz。与文献[6]中提出的 LBS-EBG 结构相比，CBS-EBG 结构在保持高频段 SSN 抑制性能的同时，使阻带下限截止频率由  $432$  MHz(该值为文献[6]中的测量值，本文中的仿真值为  $452$  MHz)下降至  $294$  MHz，有效降低了阻带中心频率，改善了 EBG 结构低频段 SSN 的抑制性能。

当 EBG 结构应用于 PCB 的 SSN 抑制时，要求在整个电源平面内对 SSN 都具有良好的抑制作用。CBS-EBG 结构两层仿真模型中端口 1 到端口 2 和端口 3 的传输参数仿真对比如图 6 所示。结果显示，在相同激励的情况下，除了  $S_{31}$  参数在  $5.8$  GHz 附近退化至  $-30$  dB 外， $S_{31}$  与  $S_{21}$  特性曲线在阻带范围内基本一致，CBS-EBG 结构在整个电源平面内都可以有效抑制 SSN。

### 3.2 CBS-EBG 结构性能测试及分析

为了验证仿真结果的正确性，依据前文所述，制作与 3 种仿真模型(CBS-EBG 结构模型、LBS-EBG 结构模型及完整电源平面模型)相对应的 PCB，PCB 中端口的设置与仿真模型中设置的相同，使用 Agilent N9918A 进行传输参数测量。

3 种 PCB 模型下端口 1 到端口 2 的传输参数实测结果对比如图 7 所示。对比结果表明，实测结果与仿真结果具有良好的一致性，CBS-EBG 结构和 LBS-EBG 结构下限截止频率实测值分别为  $296$  MHz 和  $470$  MHz(文献[6]中的测量值为  $432$  MHz)，CBS-EBG 结构在保持高频段 SSN 抑制性能的同时，有效降低了阻带中心频率，改善了 EBG 结构低频段 SSN 的抑制性能。表 1 给出了 CBS-EBG 结构性能与已有部分成果的 SSN 抑制参数对比。

CBS-EBG 结构模型下端口 1 到端口 3 和端口 2 传输参数  $S_{31}$  与  $S_{21}$  的实测数据对比如图 8 所示，该测试结果与仿真结果一致，说明了仿真结果的正确

表 1 CBS-EBG 结构与部分成果的性能对比

结构类型	抑制深度(dB)	阻带范围(GHz)
L-型桥 <sup>[5]</sup>	-30	0.6~4.6
LBS <sup>[6]</sup>	-40	0.432~15
S-型桥 <sup>[7]</sup>	-30	0.22~7.0
TIDC <sup>[9]</sup>	-30	0.29~7.4
VIB <sup>[10]</sup>	-30	1.7~8.5
VSI <sup>[11]</sup>	-40	0.65~20
本文结构	-40	0.296~15

性，CBS-EBG 结构在整个电源平面内对 SSN 都具有良好的抑制作用。

## 4 信号完整性分析

本文提出的 CBS-EBG 结构具有结构简单、阻带范围较宽且阻带中心频率较低的特点。然而，当使用 CBS-EBG 结构矩阵替代完整的平行板电源平面时，不可避免会导致电源平面的不连续。当信号以该平面为参考平面时，信号返回路径将被迫改变，信号回路电感增大，导致传输线阻抗不连续，最终引起信号反射、串扰及 EMI 等问题。当信号以完整的 EBG 结构平面为返回路径时，CBS-EBG 结构和 LBS-EBG 结构下相邻结构单元间信号回路的示意图如图 9 所示：由于结构单元之间特殊的连接方式，导致 CBS-EBG 结构下信号路径和信号返回路径包围的信号回路面积远远大于 LBS-EBG 结构下的信号回路面积，CBS-EBG 结构将导致比 LBS-EBG 结构更加严重的信号完整性问题。

针对 CBS-EBG 结构带来的信号完整性问题，本文通过使用局部拓扑<sup>[6,16]</sup>并保持传输线参考平面连续的策略改善 CBS-EBG 结构的信号完整性。为了验证该策略下 CBS-EBG 结构的信号完整性及 SSN 抑制能力，制作了如图 10 所示的 4 层 PCB 仿

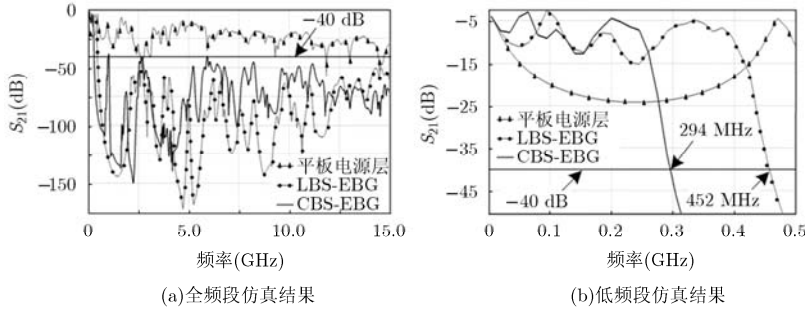


图 5 传输参数  $S_{21}$  仿真对比

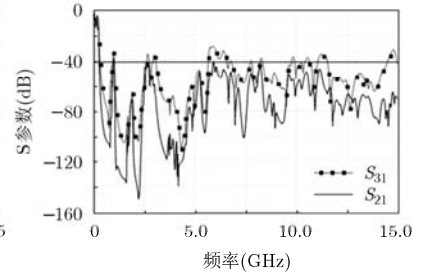


图 6 CBS-EBG 结构  $S_{31}$  与  $S_{21}$  仿真对比

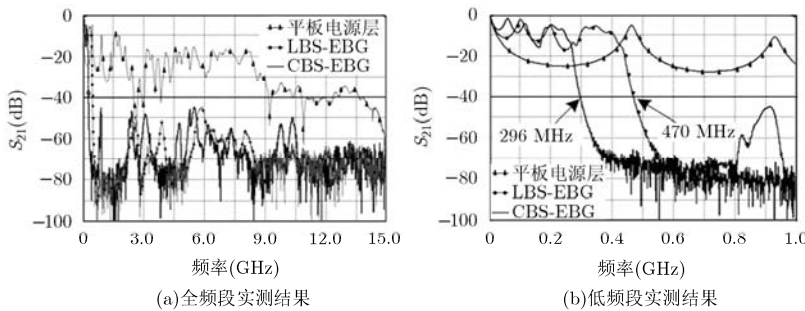


图 7 传输参数  $S_{21}$  实测结果对比

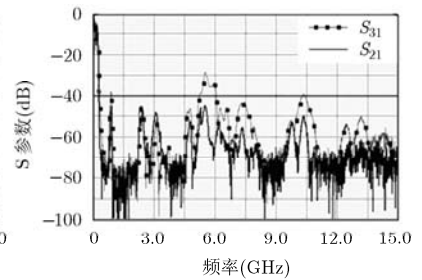


图 8 CBS-EBG 结构  $S_{31}$  与  $S_{21}$  实测对比

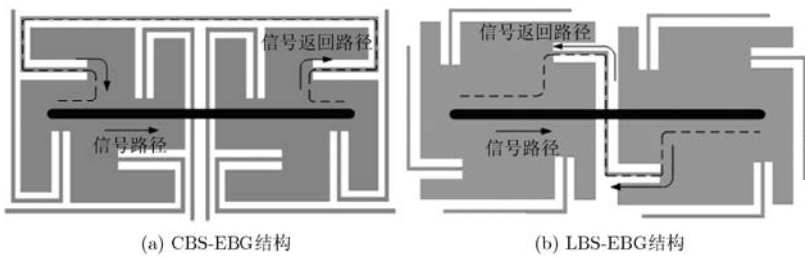


图 9 两种结构下信号回路示意图

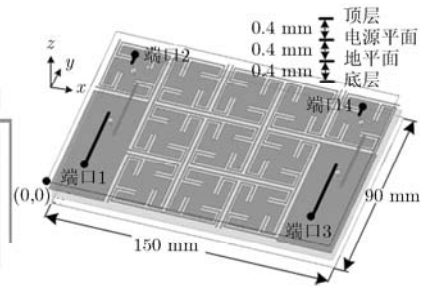


图 10 4 层 PCB 结构模型

真模型，电源层使用局部拓扑下的 CBS-EBG 结构，地平面保持完整，顶层和底层为信号层。模型中，使用完整平面代替如图 10 所示的 4 个 CBS-EBG 结构单元，CBS-EBG 结构单元尺寸及介质参数如前文所述，模型尺寸如图 10 所示，层间距为 0.4 mm。同时在模型中制作了两条传输线，一条传输线由顶层(15 mm, 15 mm)到(15 mm, 45 mm)后，经过孔到达底层，经底层到达(15 mm, 75 mm)，再经过孔到达顶层后，最终到达(15 mm, 80 mm)；第 2 条传输线采用相同的换层策略，坐标分别为(135 mm, 15 mm)-(135 mm, 45 mm)-(135 mm, 75 mm)-(135 mm, 80 mm)。传输线阻抗为 50  $\Omega$ ，同时分别在传输线两端添加 50  $\Omega$  集总同轴端口。该模型下传输线的传输特性参数仿真对比如图 11 所示，两者信号传输特性曲线

$S_{21}$  基本重合，说明当使用局部拓扑并采用适当的走线策略时，CBS-EBG 结构可以实现与完整平面想近的信号完整性。

与仿真结果相对应的实测结果对比如图 12 所示，其中，与仿真模型相比，由于实际的 PCB 模型中多出两个连接信号线与 SMA 接头的过孔，导致高频段信号线传输性能的退化较严重，但通过与局部 LBS-EBG 结构下信号传输特性的对比可以得出，在局部拓扑下，CBS-EBG 结构可以实现与 LBS-EBG 结构相近的信号完整性。

为了直观地观察局部拓扑 CBS-EBG 结构下信号的质量，使用 Ansoft Designer 软件进行信号眼图的仿真分析，在 4 层 PCB 仿真模型的端口 1 处添加  $2^7-1$  伪随机二进制序列源，在端口 2 处观察信号传输质量。伪随机序列源的中心频率为 3 GHz，信号

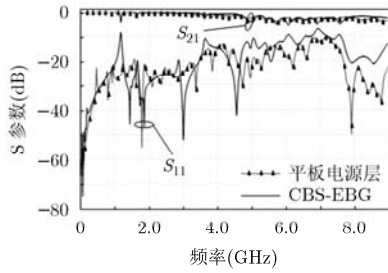
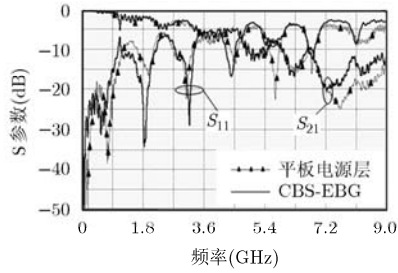
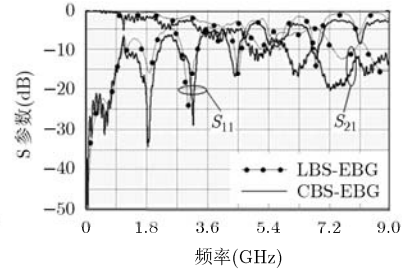


图 11 传输线传输特性参数仿真



(a)局部CBS-EBG与完整电源平面



(b)局部CBS-EBG与局部LBS-EBG

图 12 传输线传输特性参数实测对比

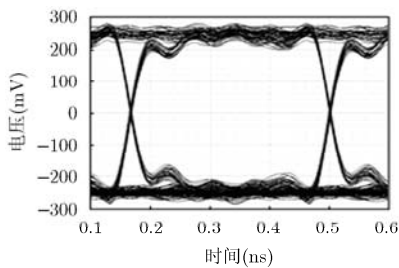
上升时间及下降时间均为 120 ps，信号摆幅为 500 mV。各模型下传输线的信号仿真眼图如图 13 所示，其中，图 13(a)为参考平面为完整平面时单端信号眼图；图 13(b)为参考平面为 CBS-EBG 结构矩阵时单端信号眼图；图 13(c)为参考平面为局部拓扑 CBS-EBG 并采用保持信号参考平面连续的布线策略时单端信号的眼图。仿真结果的眼图参数对比如表 2 所示，结果显示：相较于以完整平面为参考平面，当单端信号以 CBS-EBG 结构矩阵为参考平面时，信号眼高(Maximum Eye Open, MEO)由 423 mV 下降至 150 mV，眼宽(Maximum Eye Width, MEW)由 326 mV 下降至 283 mV，信号眼高和眼宽分别退化 64.5%和 13.2%，信号质量退化严重，说明当单端信号以 CBS-EBG 结构为参考平面时存在严重的信号完整性问题；当采用局部拓扑并选择保持传输线参考平面连续的布线策略时，单端信号眼高为 365 mV，眼宽为 321 mV，与完整平面信号眼图相比，

表 2 信号仿真眼图参数对比

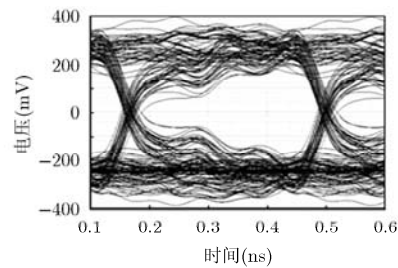
模型说明		眼高 MEO	眼宽 MEW
参考平面	信号类型	(mV)	(mV)
完整平面	单端信号	423	326
CBS-EBG	单端信号	150	283
局部 CBS-EBG	单端信号	365	321

眼高和眼宽的降低程度分别为 13.7%和 1.5%，表明当使用局部拓扑并采用适当的走线策略时，能够明显改善该结构的信号传输质量，局部 CBS-EBG 结构可以实现较好的信号完整性。

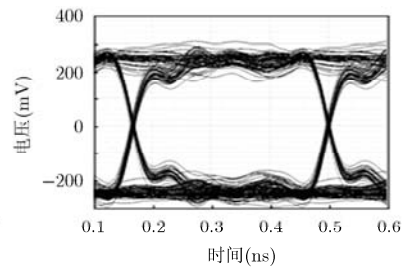
当一条传输线经过过孔进行换层时，开关噪声将耦合至电源、地平面构成的平行板波导中并在 PDN 中传播，再通过其他信号换层过孔，将能量耦合至其他传输线中，导致信号完整性问题。该模型下端口 1 和端口 3 之间的传输特性参数  $S_{31}$  的仿真结果如图 14(a)所示，实测结果如图 14(b)所示：结果



(a)完整平面结构

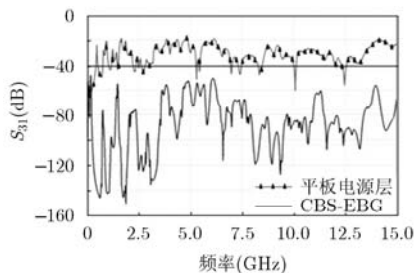


(b) CBS-EBG结构

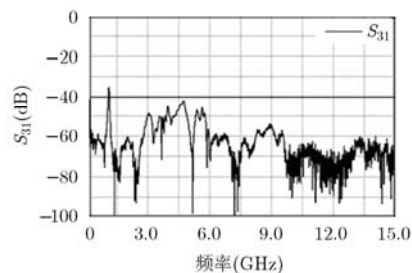


(c)局部CBS-EBG结构

图 13 信号眼图



(a)仿真结果



(b)实测结果

图 14 局部拓扑下 CBS-EBG 结构  $S_{31}$

显示,在局部拓扑下,CBS-EBG结构对SSN依旧具有较好的抑制能力。

## 5 结论

本文通过设计C-型桥接连线并在桥接连线与金属贴片的连接处增加狭缝,提出了CBS-EBG结构。实测结果显示,该结构在抑制深度为 $-40$  dB时,阻带范围为296 MHz $-15$  GHz,在实现较宽阻带宽度的同时,有效降低了阻带中心频率,增强了EBG结构低频段SSN抑制能力。同时,针对CBS-EBG结构带来的SI问题,研究了局部拓扑下的信号传输特性。结果表明,当采用局部拓扑并选择适当的走线策略时,该结构在保持良好的SSN抑制性能的同时,能够实现较好的信号完整性。

## 参考文献

- [1] Wu Tzong-lin, Chuang Hao-hsiang, and Wang Ting-kuang. Overview of power integrity solutions on package and PCB: decoupling and EBG isolation[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, 52(2): 346-356.
  - [2] Kim Yong-ju, Yoon Han-sub, Lee Seong-soo, et al. An efficient path-based equivalent circuit model for design, synthesis, and optimization of power distribution networks in multilayer printed circuit boards[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2004, 27(1): 97-106.
  - [3] Prathap Muthana, Krishna Srinivasan, Arif Ege Engin, et al. Improvements in noise suppression for I/O circuits using embedded planar capacitors[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2008, 31(2): 234-245.
  - [4] Wu Chun-te, Shiue Guangk-hwa, Lin Sheng-mou, et al. Composite effects of reflections and ground bounce for signal line through a split power plane[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2002, 25(2): 297-301.
  - [5] Wu Tzong-lin, Wang Chien-chung, Lin Yen-hui, et al. A novel power plane with super-wideband elimination of ground bounce noise on high speed circuit[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2005, 15(3): 174-176.
  - [6] Li Long, Chen Qiang, Yuan Qiao-wei, et al. Ultrawideband suppression of ground bounce noise in multilayer PCB using locally embedded planar electromagnetic band-gap structures [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 740-743.
  - [7] Joo Sung-ho, Kim Dong-yeop, and Lee hai-yong. A S-bridged inductive electromagnetic bandgap power plane for suppression of ground bounce noise[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(10): 709-711.
  - [8] Shi Yong-rong, Tang Wan-chun, Liu Sheng, et al. Ultra-wideband suppression of power/ground noise in high-speed circuits using a novel electromagnetic bandgap power plane[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2013, 3(4): 653-659.
  - [9] 史凌峰, 王海鹏. 一种扩展蘑菇型 EBG 结构阻带带宽的新方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2537-2540.  
Shi Ling-feng and Wang Hai-peng. Novel method to broaden the stop-band width of the Mushroom-like electromagnetic band gap structure[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(10): 2537-2540.
  - [10] Kim Myunghoi, Koo Kyoungchoul, Kim Jounggho, et al. Vertical inductive bridge EBG (VIB-EBG) structure with size reduction and stopband enhancement for wideband SSN suppression[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2012, 22(8): 403-405.
  - [11] Kim Myung-hoi, Koo Kyoung-choul, Shim Yu-jeong, et al. Vertical stepped impedance EBG (VSI-EBG) structure for wideband suppression of simultaneous switching noise in multilayer PCBs[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(2): 307-314.
  - [12] Wang Chuen-de and Wu Tzong-lin. Model and mechanism of miniaturized and stopband-enhanced interleaved EBG structure for power/ground noise suppression[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(1): 159-167.
  - [13] Li Long, Li Bin, Liu Hai-xia, et al. Locally resonant cavity cell model for electromagnetic band gap structures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(1): 90-100.
  - [14] Kim Ki-hyuk and 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 on Microwave and Techniques*, 2008, 56(1): 178-186.
  - [15] Raimondo L, De Paulis F, and Orlandi A. A simple and efficient design procedure for planar electromagnetic bandgap structures on printed circuit boards[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(2): 482-490.
  - [16] Zhu Hao-ran, Li Jian-jie, and Mao Jun-fa. Ultra-wideband suppression of SSN using localized topology with CSRRs and embedded capacitance in high-speed circuits[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(2): 764-772.
- 陈朋: 男, 1981年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高速系统设计与信号完整性。  
汝岩: 男, 1986年生, 硕士生, 研究方向为高速电路电源完整性与信号完整性。  
廖立科: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为嵌入式系统设计与信号完整性。