

电磁带隙结构的信号完整性分析

丁同浩^① 李玉山^① 张伟^② 闫旭^① 曲咏哲^①

^①(西安电子科技大学电路 CAD 研究所 西安 710071)

^②(西安电子科技大学天线与微波国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文运用 HFSS 和 S 参数模型, 分别从时域和频域的角度通过仿真实验研究和分析了电磁带隙(EBG)结构对信号传输特性的影响, 研究表明 EBG 结构的周期性高阻平面导致了传输信号的反射与滤波, 严重影响了信号传输质量。平面周期越小, 影响越大。最后通过实验仿真和理论分析给出了 EBG 结构的应用规则。

关键词: 电磁带隙结构; 高阻平面; 同步开关噪声

中图分类号: TN811

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1267-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00568

The Signal Integrity Analysis of Electromagnetic Band-Gap Structure

Ding Tong-hao^① Li Yu-shan^① Zhang Wei^② Yan Xu^① Qu Yong-zhe^①

^①(Institute of Electronic CAD, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(National Key Lab of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The influence of Electromagnetic Band-Gap (EBG) structure on signal transmission is investigated in this paper. The signal integrity in time domain and frequency domain is analyzed by HFSS and S parameter model. The simulation results show that the signal reflection and filter are induced by periodic structure, signal quality is affected seriously. The smaller period is, the worse signal quality is. Finally, the design rules for high-speed circuit in EBG structure are derived from the results obtained.

Key words: Electromagnetic Band-Gap (EBG) structure; High-impedance plane; Simultaneous switching noise

1 引言

随着同步开关噪声(Simultaneous Switching Noise, SSN)问题的日益严重, 电磁带隙结构被广泛研究以应用于抑制 SSN 在电路板中传播。目前, EBG 结构的 SSN 抑制的研究已经取得了很多成果^[1-7], 无论从 SSN 抑制的幅度, 还是噪声抑制的带宽都已经达到了很高要求。EBG 结构的周期性高阻平面可以把 SSN 抑制在本地贴片内, 也正是由于周期性高阻平面破坏了信号线完整的返回路径, 引发了严重的信号完整性问题, 因此对于 EBG 结构传输特性的研究变得异常重要。通常, 设计师通过使用差分线^[8, 9]来提高信号质量, 这样将导致电路设计成本和电路板布线空间的增加, 不益于大型电路的设计, 因此设计师对于 EBG 结构的使用应当慎重地权衡其优缺点。

目前国内外对于 EBG 的传输特性只进行了很

少的研究工作^[10], 且没有给出有益于电路设计的规则。本文运用 HFSS 和 S 参数模型, 从频域和时域的角度协同分析和研究了 EBG 结构对于信号传输的影响, 并给出了电路设计的经验法则, 为方便电路设计提供了有益的参考。

2 EBG 结构传输特性研究

2.1 频率分析

EBG 的传输线结构及参数($p, L, h_1, h_2, \epsilon_r$)如图 1 所示, 特性阻抗 $Z_0=50 \Omega$ 的传输线位于贴片与地平面的中心位置, 线宽 $W=0.1524 \text{ mm}$, p 表示贴片的大小, L 表示贴片上下参考平面的大小, h_1 和 h_2 分别表示贴片与电源平面和地平面的间距, ϵ_r

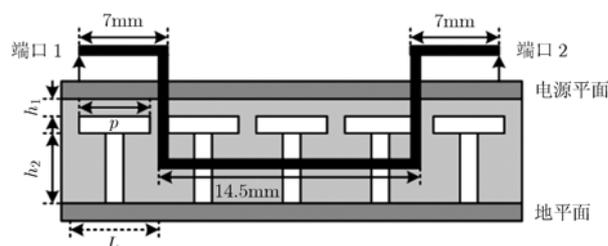


图 1 EBG 传输线结构横截面示意图

2009-04-19 收到, 2009-09-09 改回

国家自然科学基金(60672027, 60871072)和教育部博士点基金

(20050701002)资助课题

通信作者: 丁同浩 dingtonghao1985@126.com

为结构介质的介电常数。为了获得 EBG 结构对信号传输的影响,本文研究了 3 种不同参数 EBG 结构的传输特性。3 种结构的参数分别为,结构 1: (6.75mm, 7 mm, 0.1 mm, 0.4 mm, 4.4), 结构 2: (4.75 mm, 5 mm, 0.1 mm, 0.4 mm, 4.4), 结构 3: (2.75 mm, 3 mm, 0.1 mm, 0.4 mm, 4.4)。

利用 HFSS 仿真的 3 种结构得到的带隙特性和传输特性如图 2 所示, EBG 结构的高阻平面能够在特定的频率内抑制 SSN 的传播, 同时 EBG 周期性结构变化破坏了传输线连续的返回路径, 产生了周期性的阻抗变化, 引发了信号扰动。由图 2(a)可知, 3 种结构的频率带隙分别为, 结构 1: 1.57 GHz~4.34 GHz, 结构 2: 2.52 GHz~6.98 GHz, 结构 3: 4.80 GHz~13.92 GHz, 虽然结构 3 的完整带隙超过了图中给出的频率范围, 但是这不会影响问题的说明。

如图 2(b)所示, 在 EBG 的频率带隙内, 传输线表现出极其出色的传输性能, EBG 结构的高阻平面不仅作用为理想的参考平面, 而且抑制了平行谐振腔产生的带隙频率内的谐振模, 但是当信号频率处于带隙频率边缘, 传输性能急剧恶化, 这主要是由于阻抗的周期性不连续引发的。单位长度阻抗变化频率越大(单位长度的贴片间隙个数), 带隙外的传输函数的波动就越大, 在研究的 3 种结构中, 结构 1 的贴片最大, 阻抗变化频率最小, 其带隙边缘的传输函数波动也最小, 最大波动值为 0.55 dB, 结构 3 的贴片最小, 阻抗变化频率最大, 传输函数波动最大, 最大值为 4.64 dB, 结构 2 处于两者之间, 最大波动值为 1.58 dB, 结构 3 的阻抗变化频率为结构 1 的 2.5 倍, 结构 3 传输函数波动却是结构 1 的 8 倍多, 远大于贴片尺寸的变化幅度。

周期性数字信号可以表示成如式(1)所示的不同频率点正弦信号和余弦信号的叠加。由 EBG 传输特性可知, 对于不同频率的信号有不同的传输衰减, 特定频率点的传输函数绝对值越大, 信号的衰减也就越大。理想传输线的传输函数在图 2 (b)中呈现线性下降趋势, 任何传输函数非线性波动都会导致输出信号波形失真。波动越大, 信号波形失真越严重。

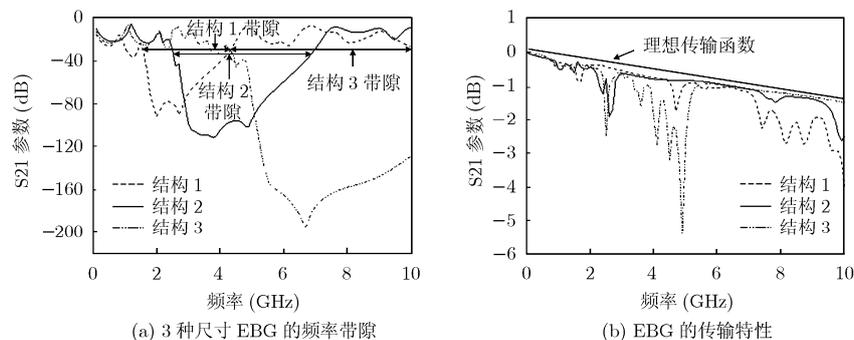


图 2

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (1)$$

2.2 宽频信号时域分析

本文通过 Hspice 对 HFSS 仿真得到的 S 参数模型进行眼图分析来对 EBG 结构的传输特性进行时域分析, 3 种尺寸 EBG 仿真得到的眼图如图 3 所示。在 Hspice 中通过一信号源产生 2^7-1 的伪随机二进制码, 数据传输速率为 2.5 GHz, 上升时间和下降时间均为 50 ps, 信号源输出信号幅值和源端阻抗分别为 1 V 和 10 Ω 。由式(2)可以估算出信号的带宽为 7 GHz^[10], 涵盖了 3 种尺寸 EBG 传输函数波动对信号传输质量的影响, RT 表示信号的上升时间。

$$BW = 0.35/RT \quad (2)$$

3 种结构眼图的眼宽, 眼高参数如表 1 所示。结构 1 到结构 3 输出信号的波形扰动依次增大, 结构 1 较小的阻抗变化频率对信号质量没有产生太多影响, 表现了很好的信号传输特性, 而结构 3 过大的阻抗变化频率导致了最严重的信号扰动, 影响了信号传输质量。时域仿真结果与频率分析结果取得了很好的一致, 验证了之前的分析。

表 1 3 种尺寸 EBG 的眼图参数

结构	眼宽	眼高
1	385 ps	0.761 V
2	375 ps	0.744 V
3	360 ps	0.713 V

从时域角度来说, EBG 结构对传输线输出信号的影响有两方面原因: (1)当传输线跨过 EBG 的周期性高阻平面, 阻抗的不连续会导致信号在各贴片间来回反射, 使得输出信号波形上下波动(振铃现象)。(2)割裂的高阻平面破坏了信号电流的返回路径, 增大了信号回路的电感, 增加的额外电感滤除了信号的一部分高频分量, 减缓了边沿变化率, 使输出信号变得平滑, 从而导致信号波形失真。

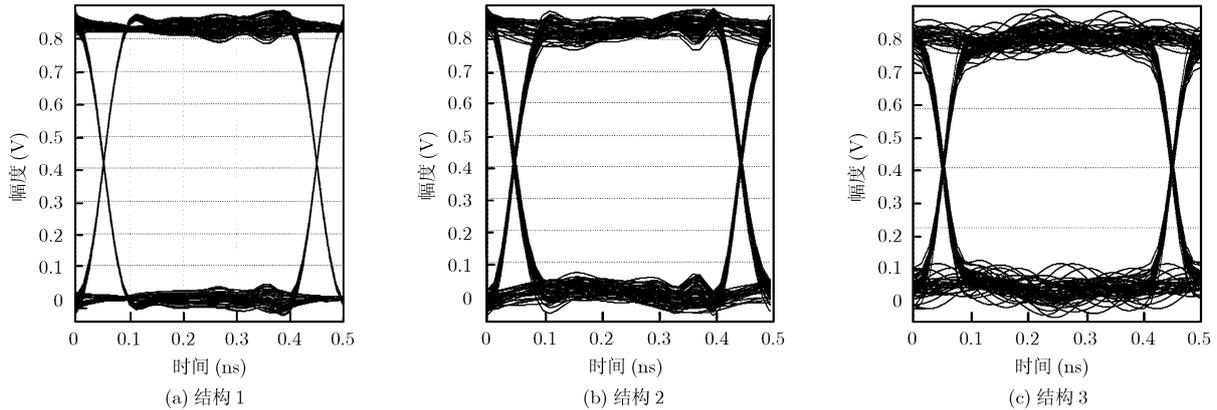


图 3 3 种尺寸 EBG 结构的眼图

2.3 带隙频率内信号时域分析

根据 EBG 传输线结构 1 的频率带隙位置: 1.57 GHz~4.34 GHz, 将上述 Hspice 仿真使用的信号源的数据传输速率改变为 4 GHz, 信号的上升时间和下降时间改变为 150 ps。由式(2)可得信号的带宽大约为 2.3 GHz, 信号所处带宽位置大约从 2 GHz 到 4.3 GHz, 处于 EBG 的带隙频率内。

仿真得到的信号眼图如图 4 所示, 眼高为 0.78 V, 大于图 3 (a)眼图的眼高。比较图 4 与图 3 (a)可知, 带隙内信号的输出波形要比带隙外信号的输出波形平滑, 扰动明显减小, 说明 EBG 对频率带隙内的信号扰动有明显抑制, 信号质量得到明显提高。对处于频率带隙内的信号来说, EBG 高阻平面为返回信号提供了一条短路路径, 使信号波形不受 EBG 高阻平面的影响。

3 结论

本文从频域和时域的角度共同研究了 EBG 结构对信号传输的影响, 单位长度阻抗变化频率越大, EBG 频率带隙外的信号波形恶化就越严重, 当信号带宽处于频率带隙内, 传输线表现出优异的传输特性。综合上述分析, 本文最后给出 EBG 结构在电路

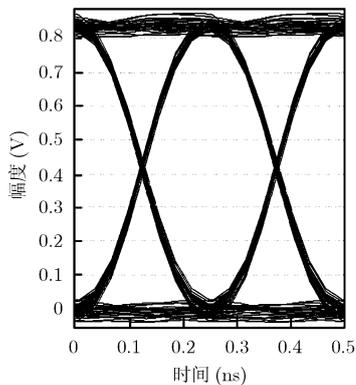


图 4 结构 1 频率带隙内的信号眼图

设计中的设计规则: (1)信号层应尽量避免与 EBG 结构层相邻。(2)在满足 SSN 抑制的频率要求下, 应选择阻抗变化频率小的 EBG 结构。(3)当信号线与 EBG 结构层相邻, 其信号频率应保持在 EBG 结构的频率带隙内。

参考文献

- [1] Joo S H, Kim D Y, and Lee H Y. S-bridged inductive electromagnetic bandgap power plane for suppression of ground bounce noise. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(10): 487-489.
- [2] Shahparnia S and Ramahi M O. Electromagnetic interference (EMI) reduction from printed circuit boards (PCB) using Electromagnetic bandgap structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(4): 580-586.
- [3] Sabbagh M A E and Mansour R R. Ultra-wide suppression band of surface waves using periodic microstrip-based structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(3): 671-683.
- [4] Abhari R and Eleftheriades G V. Metallo-dielectric electromagnetic bandgap structures for suppression and isolation of the parallel-plate noise in high-speed circuit. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, 51(6): 1629-1639.
- [5] Kim K H and Schutt A J E. Analysis and modeling of hybrid planar-type electromagnetic-bandgap structures and feasibility study on power distribution network application. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(1): 178-186.
- [6] Park J, Lu A C W, Chua K M, Wai L L, Lee J, and Kim J. Double-stacked EBG structure for wideband suppression of simultaneous switching noise in LTCC-based SiP application. *IEEE Microwave and Wireless Components Letter*, 2006, 16(9): 481-483.
- [7] Sievenpiper D, Zhang L, Broas R F J, Alexopolous N G A, and Yablonoitch E. High-impedance electromagnetic

- surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2059-2073.
- [8] Qin J O, Ramahi M, and Granatstein V. Novel planar electromagnetic bandgap structures for mitigation of switching noise and EMI reduction in high-speed circuits. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 49(3): 661-669.
- [9] Wu T L, Lin Y Y, Wang C C, and Chen S T. Electromagnetic bandgap power/ground planes for wideband suppression of ground bounce noise and radiated emission in high-speed circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(9): 2935-2942.
- [10] Shih C H, Shiue G H, Wu T L, and Wu R B. The effects on SI and EMI for differential coupled microstrip lines over LPC-EBG power/ground planes. 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore, May, 2008: 164-167.
- 丁同浩: 男, 1985年生, 博士生, 从事信号完整性、电源完整性、高速电路设计、电磁新材料的研究工作.
- 李玉山: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 主要从事电子自动化设计、计算机视觉处理电路与系统设计、高速系统设计与信号完整性的研究工作.
- 张伟: 女, 1984年生, 硕士生, 从事电磁新材料、波导相控阵天线等方向的研究工作.
- 闫旭: 女, 1984年生, 博士生, 从事信号完整性、电源完整性的研究工作.
- 曲咏哲: 男, 1979年生, 博士生, 从事信号完整性、电源完整性的研究工作.