

文章编号: 1001-893X(2012)10-1681-05

非均匀微带线电磁脉冲耦合特性分析*

李春荣^{1,2}, 袁奇伦², 王新政¹, 吕怀武²

(1. 海军航空工程学院 科研部, 山东 烟台 264001; 2. 解放军 93502 部队 装备部, 呼和浩特 010051)

摘要: 针对电磁脉冲与非均匀微带线的耦合问题, 基于时域有限差分法和卷积完全匹配层, 研究了不同弯曲和不同斜切角非均匀微带线的电磁脉冲耦合特性, 并对耦合机理进行了讨论。仿真结果表明: 由于结构的非均匀性, 微带线不同端口的耦合系数相差较大; 电磁脉冲入射方向对耦合系数具有重要影响, 不同方向耦合系数相差约 60 dB; 微带线拐角斜切对降低电磁耦合效果不明显。所得结论对提高微带电路和电子系统抗强电磁脉冲打击能力具有重要意义。

关键词: 电磁脉冲; 非均匀微带线; 耦合效应; 时域有限差分法; 卷积完全匹配层

中图分类号: TN015 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.10.024

Characteristics Analysis of Electromagnetic Pulse Coupling onto Nonuniform Microstrip Line

LI Chun-rong^{1,2}, YUAN Qi-lun², WANG Xin-zheng¹, LV Huai-wu²

(1. Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Equipment Department, Unit 93502 of PLA, Hohhot 010051, China)

Abstract: To analyse the coupling effects of electromagnetic pulse (EMP) onto nonuniform microstrip line, time-domain finite-difference (FDTD) method and convolution perfectly matched layer (CPML) are presented. The influence of the trace bend and the out miter is taken into account, and then the coupling mechanism is discussed. The results show that due to the nonuniform of microstrip line, the coupling coefficients of the ports are very different. The direction of incident EMP takes great influence on the coupling coefficients, and the difference is about 60 dB, and the out miter of microstrip line has little influence on coupling coefficients. The study is significant for improving the defense ability of microstrip circuit and electronic system against EMP effects.

Key words: electromagnetic pulse; nonuniform microstrip line; coupling effects; FDTD method; convolution perfectly matched layer

1 引言

微带线是现代微波集成电路中广泛应用的互连线形式。由于几何和场结构的复杂性, 微带线与电磁脉冲耦合机理较普通传输线更加复杂, 已成为研究强电磁脉冲对微波集成电路毁伤效应的重要内容之一^[1-2]。非均匀微带线指其特性阻抗沿纵向(信号传播方向)发生连续或非连续变化, 通常对应于传

输线的横向物理结构或纵向媒质参数发生变化^[3]。非均匀性破坏了微带线内场传输的连续性, 产生反射、辐射以及对周围电路的耦合, 严重制约了信号传输的完整性。非均匀微带线上信号完整性的研究已有很多^[3-6], 但对强电磁脉冲辐照下非均匀微带线的电磁耦合特性研究还较少^[7-10]。文献[7-8]将微带线导体带纵向剖分, 采用多导体传输线理论求解微带线上的感应电压和感应电流, 文献[9]采用

* 收稿日期: 2012-04-25; 修回日期: 2012-06-06

BLT 方程求解微带线与外界电磁波的耦合效应,此类方法基于传输线理论,属于等效路的方法,未考虑天线模的影响。而求解强电磁脉冲与微带线耦合效应时,感应电流中天线模分量是微带线二次辐射的主要能量来源,其影响不能被忽略。本文采用全波方法分析微带线的电磁耦合效应,应用具有集总元件的时域有限差分 (Time-domain Finite-difference, FDTD)^[11]法,结合卷积完全匹配层 (Convolution Perfectly Matched Layer, CPML)^[12-13],研究不同弯曲和不同斜切角对非均匀微带线电磁耦合特性影响,求解精度和效率均有较大提高。

时域有限差分法在求解宽频带电磁问题上的优势,以及广泛的适用性和良好的通用性,成为当前研究电磁脉冲耦合效应的主要数值方法。应用 FDTD 求解简单微波电路时,可将电尺寸较小的集总元件嵌入到 FDTD 网格中,利用集总元件的伏安特性和 Maxwell 方程之间的关系,改进 FDTD 的迭代公式^[11]。该方法在保证计算精度的前提下,可有效提高具有简单负载微波集成电路的计算效率。卷积完全匹配层吸收边界条件主要针对各向异性介质完全匹配层 (Uniaxial Perfectly Matched Layer, UPML) 吸收边界条件存在滞后反射现象提出的,其计算内存占用率低,且不依赖于介质材料属性普适性较其他吸收边界条件高,易于编程实现^[14]。

2 仿真方法

2.1 具有集总元件的 FDTD 方程

为减小端口反射对仿真结果的影响,微带线终端接匹配负载。以电阻负载为例,微带线设置如图 1 所示。

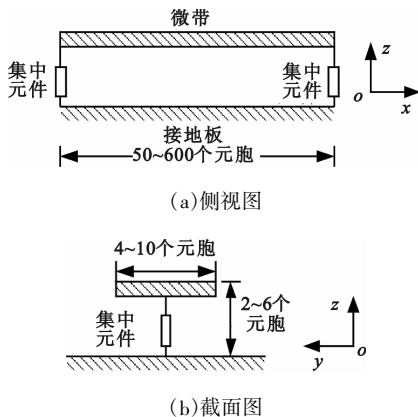


图 1 具有集总元件的微带传输线

Fig.1 The schematic diagram of microstrip line

以电阻为集总元件,推导电阻 R 所在位置的 FDTD 公式。假设集总元件尺寸小于一个 FDTD 元胞,在磁场旋度方程中增加集总元件电流 J_L 代表集总元件的贡献,即:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \nabla \times H - J_C - J_L \tag{1}$$

其中, $J_C = \sigma E$ 为传导电流。设 J_L 沿 z 方向,则 J_L 与元件总电流 I_L 的关系为

$$J_L = \frac{I_L}{\Delta x \Delta y} \tag{2}$$

则式(1)电场 z 分量的 FDTD 关系式为

$$E_z^{n+1}(i,j,k+\frac{1}{2}) = E_z^n(i,j,k+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\epsilon_0} (\nabla \times H)_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta x \Delta y} I_L^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2}) \tag{3}$$

由 FDTD 中 E_z 节点电场值表示电流 I_L ,可得电阻 R 处的电场 FDTD 公式:

$$E_z^{n+1}(i,j,k+\frac{1}{2}) = \frac{1 - \frac{\Delta t \Delta z}{2R\epsilon_0 \Delta x \Delta y}}{1 + \frac{\Delta t \Delta z}{2R\epsilon_0 \Delta x \Delta y}} E_z^n(i,j,k+\frac{1}{2}) + \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon_0}}{1 + \frac{\Delta t \Delta z}{2R\epsilon_0 \Delta x \Delta y}} (\nabla \times H)_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \tag{4}$$

2.2 卷积完全匹配层

在 UPML 的介电参数中, $\omega \rightarrow 0$ 时会造成 $S_x \rightarrow -j\infty$,所以在低频情况下,UPML 会产生滞后反射。为了克服此现象,Roden 和 Gedney 利用递归卷积技术来计算修正吸收层中的递推公式。以 E_x 为例给出 CPML 中的递推公式为^[12-14]

$$\begin{aligned} & \epsilon_x \epsilon_0 \frac{E_x^{n+1}(i+1/2,j,k) - E_x^n(i+1/2,j,k)}{\Delta t} + \\ & \sigma_x \frac{E_x^{n+1}(i+1/2,j,k) + E_x^n(i+1/2,j,k)}{2} = \\ & \frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2,j+1/2,k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2,j-1/2,k)}{K_y \Delta y} - \\ & \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2,j,k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2,j,k-1/2)}{K_z \Delta z} + \\ & \psi_{exy}^{n+1/2}(i+1/2,j,k) - \psi_{exz}^{n+1/2}(i+1/2,j,k) \end{aligned} \tag{5}$$

其中,

$$\psi_{exy}^{n+1/2}(i+1/2,j,k) = b_y \psi_{exy}^{n-1/2}(i+1/2,j,k) + a_y \frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2,j+1/2,k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2,j-1/2,k)}{\Delta y}$$

$$\begin{aligned} \psi_{exz}^{n+1/2}(i+1/2,j,k) &= b_z \psi_{exz}^{n-1/2}(i+1/2,j,k) + \\ &a_z \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2,j+1/2,k) - H_y^{n+1/2}(i+1/2,j-1/2,k)}{\Delta z} \\ b_x &= \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{x,PML}}{K_x} + \alpha_x\right)\left(\frac{m\Delta t}{\epsilon_0}\right)\right] \\ b_y &= \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{y,PML}}{K_y} + \alpha_y\right)\left(\frac{m\Delta t}{\epsilon_0}\right)\right] \\ b_z &= \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{z,PML}}{K_z} + \alpha_z\right)\left(\frac{m\Delta t}{\epsilon_0}\right)\right] \end{aligned}$$

设置修正系数 $\alpha_i = 0.1, \sigma_{i,PML} = \sigma_{i,max}(\frac{d-x}{d})^m$, $i = x, y, z$ 为介质电导率, K 是大于 1 的常数, 自由空间中取 1, d 为 PML 的厚度, $\sigma_{i,max} = \frac{m+1}{200\pi\sqrt{\epsilon_r}\Delta x}$, $m = 4$ 。

3 模型设置

本文主要研究直角弯曲和斜切角对微带线电磁耦合特性的影响, 仿真模型如图 2 所示。参数设置为: 微带宽度 $w = 4\text{ mm}$, 厚度 $t = 35\text{ }\mu\text{m}$, 长度 $L_1 = 100\text{ mm}$, $L_2 = 10\text{ mm}$, 材料为铜(电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7\text{ s/m}$); 介质基片厚度 $h = 2\text{ mm}$, 材料采用 FR4, 相对介电常数 $\epsilon_r = 4.3$, 微带线两端接匹配负载 $R = 48.9\text{ }\Omega$ 。

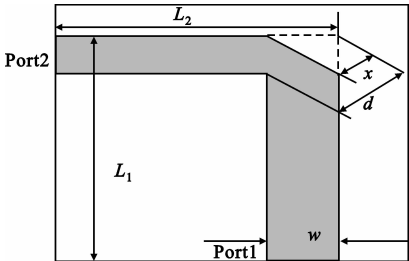


图 2 直角弯曲 45°外斜切微带线

Fig.2 Nonuniform microstrip line with a 45° out miter

入射电磁脉冲采用高斯脉冲, 其时域表达式为

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right)$$

式中, E_0 为脉冲的峰值场强, t_0 为峰值脉冲出现的时刻, τ 为脉冲宽度, 取其频宽 $f = 2/\tau$; 以圆极化平面波形式辐照微带线。为了表征电磁脉冲与微带线的耦合效应, 定义耦合系数 $\eta(f)$ 如式(6):

$$\eta(f) = 20\lg \frac{V_{\text{induced}}(f)}{E_{\text{incident}}(f) \times 1} \quad (6)$$

其中, $V_{\text{induced}}(f)$ 为微带线端接匹配负载时终端感应

电压, $E_{\text{incident}}(f)$ 为入射脉冲电场强度。

4 计算结果及分析

为了验证仿真结果的准确性, 计算了文献[10]中模型, 微带线参数为 $w = 4.85\text{ mm}$, $h = 1.57\text{ mm}$, $t = 0.1\text{ mm}$, $\epsilon_r = 2.1$, 入射波采用脉宽为 120 ps 的高斯脉冲。微带线远端耦合感应电压结果对比如图 3 所示, 可见时域波形几乎完全重合, 说明本文方法是可行的。

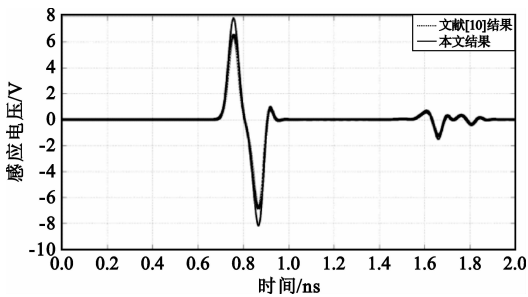


图 3 仿真方法验证

Fig.3 Validation of the simulation method

4.1 不同入射方向对耦合特性的影响

由于微带弯曲造成了微带线结构上的不对称性, 易知, 电磁波的入射方向对耦合系数会产生较大的影响。首先采用顶部垂直辐照微带线研究两端口耦合系数间的差异, 结果如图 4 所示, 可见微带线两端口耦合系数相差较大, 谐振频率发生明显偏移, 而在仿真中发现平直微带线两端口耦合系数是完全相同的。对比分析认为, 耦合系数的较大差异是由微带弯曲和 $L_1 \neq L_2$ 共同造成的, 微带弯曲使微带线分布参数发生突变, 而 $L_1 \neq L_2$ 使电磁脉冲耦合到微带上的能量分布不均匀, 两者的共同作用反映到端口上耦合系数的巨大差异。

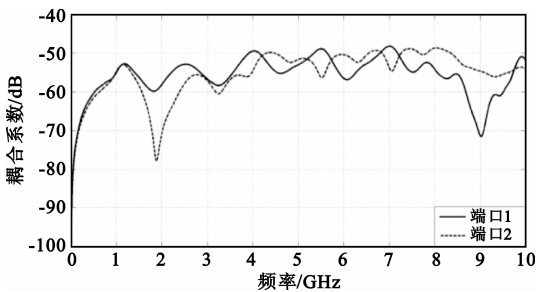


图 3 不同端口上的耦合系数

Fig.3 Coupling coefficients of different ports on microstrip line

为分析方便,以下均采用端口 1 的耦合系数作为研究对象。图 5 所示为不同入射方向时耦合系数的变化情况,可见,电磁脉冲的入射方向对耦合系数具有显著影响。顶部垂直入射时耦合系数最大,垂直于微带线长边侧向入射时耦合系数次之,其他三种情况耦合系数幅值降低约 60 dB。谐振频率在不同入射方向时相差较大,规律性不明显。根据微带天线理论分析认为,微带线的耦合机理在低频段与微带表面波耦合有关,而在高频段与其等效缝隙耦合相关。入射方向对耦合系数的影响主要是由微带线结构的不均匀性造成。

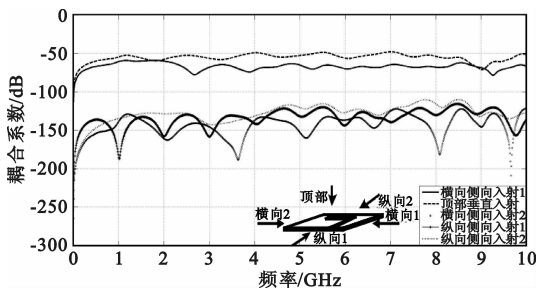


图 5 电磁脉冲入射方向对耦合系数的影响
Fig.5 The influence of incident direction on coupling coefficients

4.2 不同斜切率对耦合特性的影响

微带线拐角斜切是减小其不连续处传输和反射特性的一种常用方法。文献[5]中对文献[6]提出的微带线直角弯曲最佳斜切率进行了优化研究,给出了最佳斜切率公式为

$$M = 50.1 + 35.1 \exp(-1.35 \frac{w}{h}) + 6.5(\frac{h}{w}) \exp(-1.35 \frac{w}{h}), \frac{w}{h} \geq 0.25, \epsilon_r \leq 25 \quad (7)$$

依据文献[5-6]给出的公式分别计算了斜切深度 x 为 3.18 和 2.97 mm, 依此研究了不同斜切率时的耦合系数,如图 6 所示。与未斜切前的耦合系数对比可见,在 5 GHz 以下斜切使耦合系数幅值有所降低,但在大于 5 GHz 频段中斜切使耦合系数幅值增大;低频段中斜切对谐振频率影响较小,但在高频上斜切使微带线与电磁脉冲耦合产生新的谐振点。斜切对提高微带线中的信号完整性具有重要意义,但对降低微带线与电磁脉冲的耦合效应影响较小。

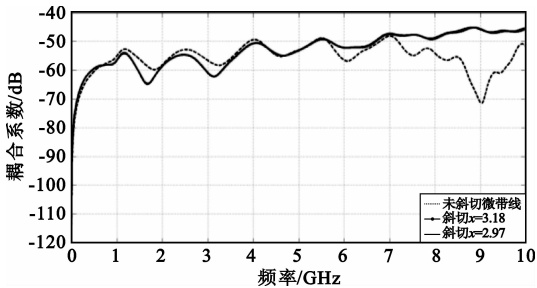


图 6 斜切对耦合系数的影响
Fig.6 The influence of out miter on coupling coefficients

5 结束语

本文采用具有集总元件的 FDTD 方程,结合 CPML 吸收边界条件,仿真分析了电磁脉冲与非均匀微带线的耦合特性,并对耦合机理进行了简要分析。与普通导线的耦合特性相比,非均匀微带线与电磁脉冲耦合特性更加复杂。由于几何结构的非对称性,微带线不同端口间耦合系数差异较大,谐振频率具有明显的偏移,但耦合系数幅值未出现数量级上的差别;电磁脉冲入射方向对耦合系数影响明显,不同方向耦合系数相差约 60 dB,且以顶部垂直入射耦合系数最大;微带线拐角斜切对降低电磁耦合效果不明显。本文对非均匀微带线耦合特性研究还仅是初步的,涉及非均匀微带线形式还较单一,相关耦合机理还需更深层次的研究。本文内容对提高微波集成电路和电子系统抗强电磁脉冲打击能力具有重要意义。

参考文献:

[1] 范颖鹏,杜正伟,龚克,等. 微带线电路板端口对入射电磁波的电压响应[J]. 强激光与粒子束,2005,17(3): 422-426.
FAN Ying-peng, DU Zheng-wei, GONG Ke, et al. Coupling of external electromagnetic field to printed circuit board trace [J]. High Power Laser and Particle Beams,2005,17(3):422-426. (in Chinese)
[2] 鱼群,王亚弟,韩继红,等. 印制电路板微带线的电磁脉冲效应及防护分析[J]. 信息工程大学学报,2011,12(4):432-436.
YU Qun, WANG Ya-di, HAN Ji-hong, et al. Electromagnetic Pulse Effects and Protection Analysis of Microstrip Line on Printed Circuit Board [J]. Journal of Information Engineering University, 2011, 12(4): 432-436. (in Chinese)
[3] 张卉. 非均匀传输线场路特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
ZHANG Hui. Research on the Field And Circuit Characteris-

- tics of Non-Uniform Transmission Line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [4] 陈建华, 牛中奇. 基于 FDTD 方法的微带线耦合噪声研究[J]. 电波科学学报, 2009, 24(2): 285 – 291.
CHEN Jian-hua, NIU Zhong-qi. Study on coupling noise of microstrip in FDTD method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(2): 285 – 291. (in Chinese)
- [5] 路宏敏, 吴保义, 姚志成, 等. 微带线直角弯曲最佳斜切率研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(5): 885 – 889.
LU Hong-min, WU Bao-yi, YAO Zhi-cheng, et al. Research on the optimal percentage miter of the microstrip right angle bend[J]. Journal of Xidian University(Natural Science Edition), 2009, 36(5): 885 – 889.
- [6] Douville R J P, James D S. Experiment Study of Symmetric Microstrip Bends and Their Compensation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 1978, 26(3): 175 – 182.
- [7] Khodabakhshi H, Cheldavi A. EM field coupling to non-uniform microstrip lines using coupled multiconductor strips model[J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2009, 17: 309 – 326.
- [8] Baqerian M, Arshadi A, Cheldavi A. The effect of an external electromagnetic field on orthogonal coupled microstrip transmission lines[J]. Progress In Electromagnetics Research C, 2009, 9: 59 – 74.
- [9] Yu Qun, Wang Ya-di, Han Jihong, et al. The terminal responses of lossy microstrip line illuminated by a plane wave [C]//Proceedings of 2011 IEEE Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics. [S. l.]: IEEE, 2011: 243 – 246.
- [10] Lapohos T, Vetri J L, Seregelyi J. External Field Coupling To MIL Networks With Nonlinear Junctions: Numerical Modeling And Experimental Validation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2000, 42(1): 16 – 29.
- [11] Taflov A, Hagness S C. Computational Electrodynamics the Finite Difference Time Domain Method [M]. Boston: Artech House, 2005: 717 – 722.
- [12] YU Wen-hua, YANG Xiao-ling, Liu Yongjun, et al. Advanced FDTD Methods Parallelization, Acceleration, and Engineering Applications[M]. Boston: Artech House, 2011: 7 – 11.
- [13] Roden J, Gedney S. Convolution PML (CPML): An Efficient FDTD Implementation of the CFS-PML for Arbitrary Medium[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2000, 27(5): 334 – 339.
- [14] 杜刘革. 基于多 GPU 的 FDTD 并行算法及其在电磁仿真中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2011: 69 – 71.
DU Liu-ge. Multiple GPU based FDTD parallel algorithm and its applications in electromagnetic simulation[D]. Jinan: Shandong University, 2011: 69 – 71. (in Chinese)

作者简介:

李春荣(1980—), 男, 山东莱州人, 2007 年于空军雷达学院获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事电磁场数值计算与电磁脉冲效应研究;

LI Chun-rong was born in Laizhou, Shandong Province, in 1980. He received the M.S. degree from Air Force Radar Academy in 2007. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns numerically calculation and EMP effects.

Email: sdlzli@163.com

袁奇伦(1971—), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要从事信息对抗技术研究;

YUAN Qi-lun was born in Chongqing, in 1971. He is now a senior engineer. His research concerns information warfare.

王新政(1949—), 男, 陕西汉中, 教授、博士生导师, 主要从事信息对抗技术、电磁脉冲效应研究;

WANG Xin-zheng was born in Hanzhong, Shaanxi Province, in 1949. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research concerns information warfare and EMP effects.

吕怀武(1982—), 男, 山东莱阳人, 2003 年于空军雷达学院获学士学位, 主要从事信息对抗技术研究。

LV Huai-wu was born in Laiyang, Shandong Province, in 1982. He received the B.S. degree from Airforce Radar Academy in 2003. His research concerns information warfare.