

基于非均匀 FDTD 混合算法的微带电路 电磁耦合分析*

唐新飞¹ 廖成¹ 叶志红² 冯菊¹

(1. 西南交通大学电磁场与微波技术研究所 成都 610031;

2. 重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘要: 微带电路包含微带线以及电路元件等局部精细结构,采用传统的 FDTD 方法进行电磁波照射 PCB 板电磁耦合的全波模拟,因网格剖分得很细,导致网格量大,计算效率低下。将非均匀 FDTD 方法与多网格集总元件 FDTD 方法结合起来,形成一种新的 FDTD 混合算法,模拟了电磁脉冲对带有集总元件微带电路的电磁耦合,能够快速计算得到集总元件上耦合产生的瞬态电压和电流响应。通过与有限积分法软件的仿真结果进行对比,验证了该时域混合算法的正确性,并分析了不同电磁脉冲类型以及微带线间距对微带电路电磁耦合的影响。

关键词: 非均匀 FDTD; 集总元件 FDTD; 多网格模型; 微带线

中图分类号: TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Coupling analysis of printed circuits based on non-uniform FDTD hybrid algorithm

Tang Xinfei¹ Liao Cheng¹ Ye Zhihong² Feng Ju¹

(1. Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Printed circuit usually makes up of microstrip lines, circuit elements and other parts of fine structures, using traditional FDTD method to simulate the electromagnetic interference of PCB board irradiated by Electromagnetic wave will lead to low computation efficiency due to a large amount of grids. In this paper, a novel hybrid algorithm in FDTD is proposed, in which the Non-uniform FDTD method and multi grid lumped element FDTD method are integrated together. As an example, the coupling problem of microstrip circuit with lumped elements excited by electromagnetic pulse is simulated and it is observed that the Transient voltage and current response of lumped elements can be rapidly obtained. Then the correctness of the hybrid method is verified with comparing with the simulation results of electromagnetic software based on the finite integral method. Finally the influences of types of electromagnetic pulses and the space between microstrip lines on the electromagnetic coupling of the printed circuit are analyzed.

Keywords: non-uniform FDTD; lumped-element FDTD; multiple grid model; microstrip lines

0 引言

在现代电子设备中,随着数字化、智能化的发展,印制电路板(PCB)由于其集成度高、体积小已经成为现代电子设备的必要组件。近年来,电子设备的小型化和轻便化成为趋势,PCB板被设计的更加紧凑,布线的间距越来越窄。由于强电磁脉冲的频谱越来越宽,干扰范围更加广泛,电磁环境变得日益复杂。外界的强电磁脉冲能够通过PCB板上的微带线耦合进入电路,对电子元件和设备电路造成损

坏和干扰。因此,分析印制电路的电磁耦合问题具有非常重要的意义。

目前,国内外很多学者对印制电路电磁耦合分析的数值方法做了大量的研究。文献[1]中提出了印制电路双线 Taylor 模型的 BLT 方程,分析了频域下平行双线的电磁耦合问题。但频域的 BLT 方程对宽频带的电磁耦合问题计算较为复杂。文献[2-3]中采用传统的 FDTD 方法分析了高功率微波脉冲对微带电路的影响,其对整个空间进行均匀剖分分析了高功率脉冲照射下集总元件的电压响应,为

收稿日期:2017-02

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB328904)、中央高校基本科研业务专项资金(2682015CX062)资助项目

了对精细结构进行模拟产生的网格量巨大。文献[4-9]研究了集总元件的多网格模型,文献[10-13]采用传统 FDTD 方法对微带电路进行了电磁干扰研究。

本文提出一种基于非均匀 FDTD 与多网格集总元件 FDTD 相结合的混合算法,由于印制电路板上微带线等精细结构,在精细结构处采用细网格进行处理,在其他计算区域采用粗网格进行剖分,来减少网格数量,并考虑实际集总元件微带电路,加载集总元件的实际尺寸可能占据两个或多个网格,采用多网格集总元件 FDTD 对集总元件进行精确模拟。从而对印制电路板进行耦合分析,实现微带电路集总元件上的耦合电压和电流响应的快速计算。

1 非均匀网格的 FDTD 混合算法的基本理论

考虑到微带电路上的微带线和集总元件为精细结构,本文研究了非均匀网格的 FDTD 混合算法对电磁脉冲照射下微带电路的电磁耦合问题进行建模和仿真。在计算空间的大区域采用粗网格剖分,然后在靠近微带电路的区域采用渐变步长,网格渐变到微带电路,对微带电路采用细网格剖分。考虑到实际集总元件的尺寸比细网格大,即集总元件需跨过多个网格,因此,在非均匀网格基础上应用集总元件多网格 FDTD 方法对连接的集总元件进行处理,实现微带电路板电磁耦合分析的快速计算

1.1 非均匀网格 FDTD 的处理

非均匀网格按照计算区域的特性对网格尺寸进行调整,用不同尺寸的网格对整个空间进行划分,在某一面网格的大小产生变化,其交界面两边各自的网格是均匀划分的。在非均匀空间中 x 、 y 、 z 三个方向的网格尺寸分别为 Δx_i 、 Δy_j 、 Δz_k ,用双重网格边长计算中心网格的距离 h_i^x 、 h_j^y 、 h_k^z 为:

$$\{h_i^x = (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})/2; i = 2, \dots, n_x\} \quad (1)$$

同理可计算出 h_j^y 、 h_k^z 。

非均匀 FDTD 算法基于 MAXWELL 方程的积分形式的离散,主要是法拉第定律和安培环路定理。

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \iint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} + \iint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (3)$$

式(2)和(3)的积分模型如图 1 和 2 所示,对式(2)和(3)进行差分离散,利用中心差分可以推导出均匀无耗各向同性媒质里的电场和磁场的差分格式为:

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) &= E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \cdot \\ &\left[\frac{1}{h_{yj}}\left(H_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, \right.\right. \\ &\left.\left. j - \frac{1}{2}, k\right)\right) - \frac{1}{h_{zk}}\left(H_y^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - \right. \\ &\left. H_y^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right)\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H_x^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) &= H_x^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + \\ &\frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{1}{\Delta z_k} \left(E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \right) - \right. \\ &\left. \frac{1}{\Delta y_j} \left(E_z^n\left(i, j + 1, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \right) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

同理根据右手准则,可以推导出 Y 和 Z 方向上的电磁场分量的迭代公式。

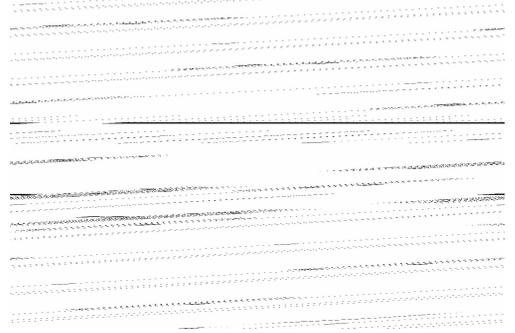


图 1 环绕 H_z 的环路



图 2 环绕 E_x 的环路

1.2 集总元件的 FDTD 多网格模型

假定集总元件小于一个 Yee 胞,含有集总元件的安培定律可以表示为:

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial D}{\partial t} + \vec{\mathcal{E}} + J_L \quad (6)$$

式中:第 1 项为位移电流,第 3 项为传导电流, J_L 是集总元件的电流密度。因此,只要获得加在集总元件上的电流密度,则可以实现场路协同计算。

在实际情况下,所接集总元件的尺寸通常大于一个网格(图 3),占据多个网格,为了更加精确的模拟这种情况,采用集总元件的多网格模型。下面以电阻为例来说明多网格模型的建立方法。设集总元件沿 Y 方向加载,在 x 、 y 、 z 方向跨接的网格数分别为 N_x 、 N_y 、 N_z ;并且电阻在这些网格内平均分配。

假设电阻值为 R_0 ,则可以计算出分配到每个网格的电阻为:

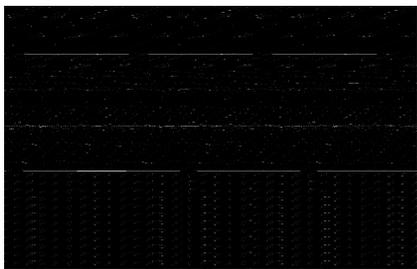


图 3 Y 方向多网格集总元件剖面图

$$R = \frac{N_x \cdot N_z}{N_y} R_0 \quad (7)$$

可以推出电流密度为:

$$J_{R_y}^{n+1}(m) = \frac{I_{R_y}^{n+1}(m)}{\Delta x \Delta z} = \frac{U_{R_y}^{n+1}}{R \cdot \Delta x \Delta z} = \frac{[E_y^{n+1}(m) + E_y^n(m)] \cdot \Delta y}{2R \Delta x \Delta z} \quad (8)$$

将(7)和(8)代入式(6)。整理得到集总元件加载多网格电场 E_y 的迭代公式:

$$E_y^{n+1}(m) = \frac{1}{\frac{\epsilon(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma(m)}{2} + \frac{\Delta y N_y}{2R_0 \Delta x \Delta z N_x N_z}} \nabla \times H_{xz}^{n+1/2} | (m) + \frac{\frac{\epsilon(m)}{\Delta t} - \frac{\sigma(m)}{2} - \frac{\Delta y N_y}{2R_0 \Delta x \Delta z N_x N_z}}{\frac{\epsilon(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma(m)}{2} + \frac{\Delta y N_y}{2R_0 \Delta x \Delta z N_x N_z}} E_y^n(m) \quad (9)$$

式(9)即电阻多网格 FDTD 的迭代公式,类似可以得到电容、电感、二极管等集总元件的多网格 FDTD 模型。

2 数值模拟与分析

以电磁波照射加载集总元件的微带电路板平行双线为例,采用该混合算法模拟电磁脉冲照射微带电路耦合产生的电压响应,与有限积分法软件的仿真结果进行对比,验证算法的正确性。

2.1 算法正确性验证

如图 4 所示,本例仿真端接电阻的平行耦合双线模型,PCB 板长 20 cm,宽 10 cm,介质层厚 1 mm,介电常数为 5.5,导电率为 0。微带线长 20 cm,宽 2 mm,厚 1 mm,线间距为 $2w=4$ mm。线 1 两端接电阻 R_1 和 R_2 ,线 2 两端接电阻 R_3 和 R_4 ;阻值均为 50 Ω 。整个计算空间网格数为 $x \times y \times z = 23 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 10.55 \text{ cm}$,计算空间用非均匀网格划分:整个空间被划分成 $242 \times 106 \times 68$ 个网格,总时间步 $nstep=4\ 800$,空间划分如下:平行双线及电阻周围区域 $\Delta x=1 \text{ mm}$, $\Delta y=0.5 \text{ mm}$, $\Delta z=1 \text{ mm}$,其他区域 $\Delta x=5 \text{ mm}$, $\Delta y=1.5 \text{ mm}$, $\Delta z=5 \text{ mm}$,时间步长 $\Delta t=0.001\ 667 \text{ ns}$,负载电阻(图 3)在 y 方向占据 2 个网格。采用平面波照射,



图 4 平面波照射下的微带电路模型

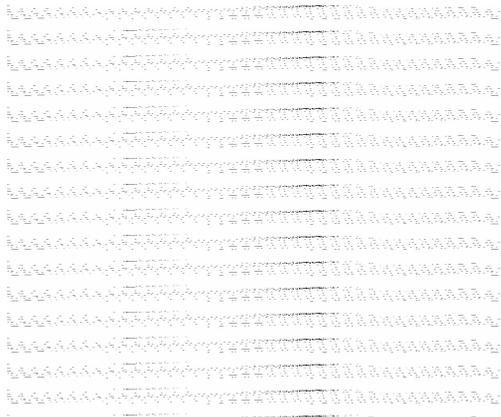


图 5 R_1 、 R_3 上的耦合电压响应

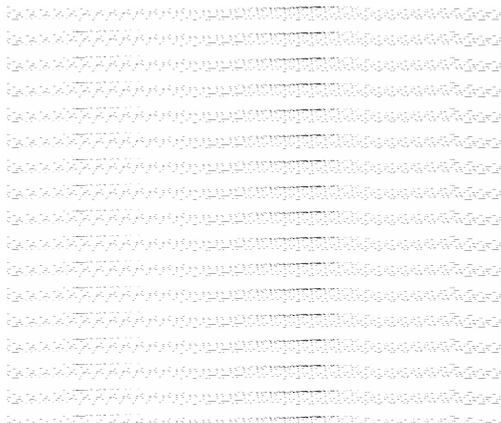


图 6 R_2 、 R_4 上的耦合电压响应

平面波为幅度为 1 V/m 的高斯脉冲,脉冲宽度为 1 ns。

图 5 和 6 给出端接负载电阻上的电压响应结果,仿真结果显示,非均匀网格 FDTD 和均匀 FDTD 吻合较好并且与时域有限积分法软件的仿真结果基本吻合,运用非均匀 FDTD 方法花费的计算时间为 605 s,所需时间为采用均匀网格进行计算下总时间的 38%。明显提高了计算速度。而且采用非均匀网格 FDTD 计算的结果其精度达到传统 FDTD 的计算精度。

2.2 印制电路板的电磁脉冲耦合规律分析

1) 算例 1

利用该新时域混合算法,分析不同类型的电磁脉冲对微带电路的电磁耦合影响,得到负载上的电压响应。印制电路板如图 4 所示,PCB 板长 20 cm,宽 10 cm,介质层厚 1 mm,介电常数为 5.5,导电率为 0。微带线长 20 cm,宽 2 mm,厚 1 mm,线间距为 $2w$;线 1 两端接电阻 R_1 和 R_2 ,线 2 两端接电阻 R_3 和 R_4 ;阻值均为 50Ω 。考虑高斯脉冲和双指数脉冲垂直照射印制电路,信号幅度为 1 V/m ,频率范围为 $0 \sim 1 \text{ GHz}$ 。图 7 和 8 给出了不同类型脉冲照射到印制电路上负载的电压响应曲线。可以看出,由于高斯脉冲的高频分量比双指数脉冲更加丰富,高斯脉冲通过电磁耦合到线上的电压幅值更大。

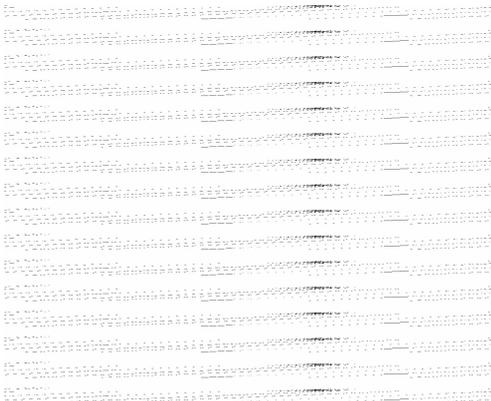


图 7 不同类型电磁脉冲照射下 R_1 、 R_3 上的电压响应

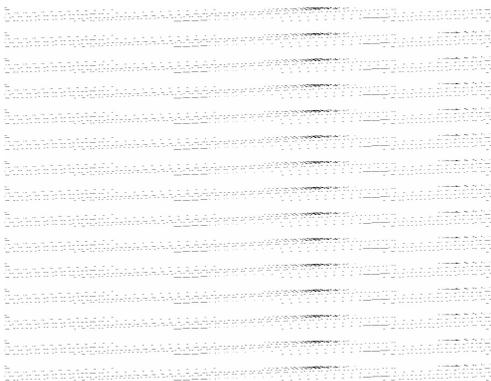


图 8 不同类型电磁脉冲照射 R_2 、 R_4 上的电压响应

2) 算例 2

采用高斯脉冲作为入射波,改变微带电路上平行微带线的线间距,分析加载电阻微带电路的电磁脉冲耦合规律。印制电路板采用算例一的模型。线间距分别取 $2w = 4 \text{ mm}$, $3w = 6 \text{ mm}$, $4w = 8 \text{ mm}$ 时,电阻上的电压响应如图 9 和 10 所示;可以看出,随着平行微带线线间距的增大,电阻上耦合的电压响应幅值变大,因为线间距增大,线间产生的

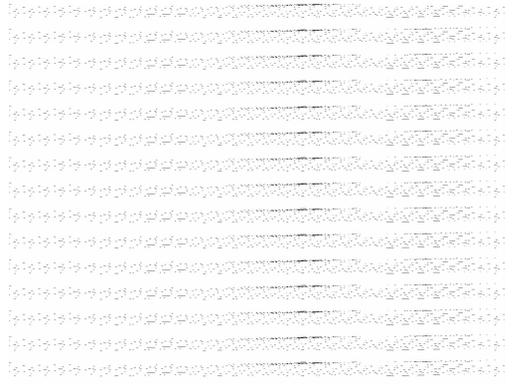


图 9 不同线间距 R_1 、 R_3 上的电压响应

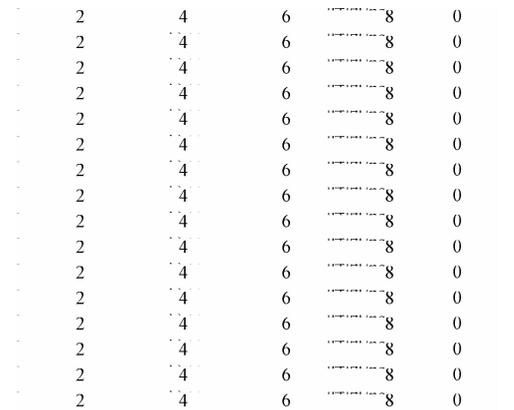


图 10 不同线间距 R_2 、 R_4 上的电压响应

串扰电压变小,而线间串扰产生的电压与空间场耦合产生的电压方向相反,增大线间距,导致负载电阻受电磁脉冲照射产生的耦合电压幅值变大。

3 结 论

本文提出了一种基于非均匀 FDTD 与多网格集总元件 FDTD 相结合的时域混合算法,模拟了微带电路的电磁耦合特性,通过平行耦合微带线电路的实例,验证了该算法的正确性。并在此基础上,结合实际工程应用分析了不同类型电磁脉冲及微带线的线距对线上耦合电压的影响,研究表明,合理的设置微带线的间距可以改善印制电路的电磁特性。对微带电路进行电磁耦合分析,为研究复杂电磁环境下电子系统的电磁干扰问题提供了一定的理论依据。

参 考 文 献

- [1] 王永峰,于成大,陈政新,李明. 印制线抗电磁干扰模型分析与计算[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 073214-1-073214-5.
- [2] 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): 285-292.
- [3] 李春荣,袁奇伦,王新政,等. 非均匀微带线电磁脉冲

- 耦合特性分析[J]. 电讯技术, 2012, 52(10): 1681-1685.
- [4] 毛剑波, 黄正峰, 杨明武, 等. 微带线不连续性辐射研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(5): 392-397.
- [5] 赵海洲, 李烟. 含集总元件的微带电路 FDTD 仿真[J]. 现代电子技术, 2009(21): 19-24.
- [6] 王胜源, 李玉山, 曹剑中. 混合有限差分方法及其在微带电路分析中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1552-1557.
- [7] ARIMA T, UNO T. Modification of FDTD method for highly accurate analysis of microstrip lines quasi-static approximation [C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2006.
- [8] 张兰勇, 刘繁明, 李冰. 印制电路板电磁辐射等效偶极子建模与预测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 942-947.
- [9] 陈智慧, 褚庆昕, 郑阳明. 微带线匹配负载的 FDTD 建模[J]. 电波科学学报, 2005, 20(6): 729-732.
- [10] 李朝辉. 基于 RLC 模型的集成电路互连线串扰估计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(5): 49-51.
- [11] KARKKAINEN M K. Efficient excitation of microstrip lines by a virtual transmission line in FDTD[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(6): 1899-1903.
- [12] 王彦良. 金属球电磁散射特性 FDTD 混合并行算法研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 75-79.
- [13] 王晓静, 叶明, 马燕. 平行互连线间串扰问题的研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 1-6.

作者简介

唐新飞(通讯作者), 1990 年出生, 硕士研究生, 研究方向为电磁兼容。

Email: 1227588577@qq.com

廖成, 1964 年出生, 教授、博导, 主要研究方向为计算电磁学、电磁兼容和天线原理与设计。

Email: c. liao@swjtu.edu.cn

叶志红, 1988 年出生, 博士, 主要研究方向为电磁兼容、天线与电波传播。

E-mail: zhihongye_love@163.com