

电磁辐射作用于计算机主板的模拟及效应评估^{*}

刘长军, 黄卡玛, 闫丽萍, 蒲天乐, 张文赋

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘 要: 提出了一种电磁辐射(EMR)效应评估的方法:通过区域分解并且引入子域敏感因子,采用电场强度的加权平均作为 EMR 效应评估的参考指标。以一款普通计算机主板作为研究对象,使用时域有限差分法(FDTD)进行模拟计算,得到了 EMR 作用下计算机主板耦合的电磁场分布。基于该效应评估方法,比较了 3~12 GHz 的平面电磁波在 0°~90°入射时对计算机主板的效应。数值模拟结果表明:随着平面电磁波入射角度的增加,EMR 对计算机主板的影响趋于减弱;EMR 频率的变化对效应没有显著影响。当 EMR 入射角度为 40°时,最高主板表面耦合的电场强度达到最大值;0°入射时,主板上平均电场强度达到最大值;随着入射 EMR 频率的升高,主板表面的最大电场强度趋于减弱。

关键词: 电磁兼容; 电磁耦合; 计算机主板; 电磁辐射; 评估; 模拟

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A

随着计算机在各领域的广泛使用,计算机产生的电磁辐射(EMR)和 EMR 对计算机的影响都成为了研究热点。一方面,计算机产生的 EMR 携带了大量的信息,如果被高灵敏度的接收设备接收,通过数据分析处理实现信息还原,可以重现计算机的屏幕显示,造成信息泄漏^[1]。美国国家安全局(NSA)和国防部联合开发的项目(TEMPEST)主要是研究计算机等电子设备信息泄漏的检测和防护^[2]。另一方面,外界 EMR 也会影响计算机等电子设备的正常工作,干扰信息的处理和传输^[3]。高功率的 EMR 甚至可以造成计算机等电子设备半导体器件的暂时或者永久失效,导致电子设备无法正常工作^[4]。各类大功率的复杂电磁干扰或者电磁脉冲都可以耦合到计算机主板,形成干扰电压和干扰电流,影响计算机的正常工作。因此,分析和模拟外界 EMR 作用下计算机主板上耦合的电磁场分布,比较不同条件 EMR 对计算机主板影响的情况,给出合适的 EMR 效应评估,具有重要的研究价值。

计算机主板上元件繁多,电路复杂,各元件的结构、尺寸、特性等差异很大。在一些 EMR 作用于计算机的研究中,往往对计算机主板进行过度简化^[5],或者主要进行机箱屏蔽作用的研究^[6]。另外一些实验研究主要分析计算机主板产生的 EMR^[7-8]。国外也有对屏蔽效应和辐射效应的相关研究^[9-10]。时域有限差分法(FDTD)是一种有效的数值计算方法,在许多电磁模拟仿真中得到应用^[11-12]。本文对一款计算机通用主板进行建模,使用 FDTD 模拟在不同频率和入射角度的时谐平面电磁波作用下,主板上耦合的电磁场分布。通过数值仿真计算,寻找主板上耦合电磁场分布与外界 EMR 之间的相互关系,给出一种 EMR 效应评估的基本方法,为 EMR 影响计算机等电子设备的研究提供参考。

1 计算机主板的模型和仿真方法

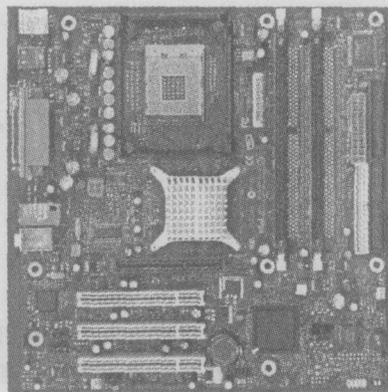
本文以一款基于 Intel 芯片组的计算机通用主板作为研究对象。该主板支持 478pin 的 Pentium IV 处理器和 533MHz 前端总线,功能先进,性能可靠,具有很强的代表性。图 1(a)为主板的照片,实际尺寸为 244 mm × 244 mm。通过对计算机主板进行 0.1 mm 精度的光学扫描,确定各元器件的相对位置和尺寸。使用 AutoCAD 软件对主板上的各元器件进行建模,得到计算机主板的几何模型如图 1(b)所示。对主板上的各类元器件进行分类处理,设置相应的电导率、相对介电常数和相对导磁率。例如,将金属材料的电导率定义为 $\sigma_{\text{metal}} = 10^6 \text{ S/m}$;塑料材料相对介电常数 $\epsilon_p = 2.2$ 。通过以上过程实现计算机主板简化模型的建立。

数值模拟采用 FDTD 算法,对计算机主板模型使用均匀网格划分,空间步长为 $\Delta_x = \Delta_y = \Delta_z = 0.625 \text{ mm}$ 。根据 FDTD 中 CFL 稳定条件的要求,在模拟计算中选取时间步长 $\Delta_t = 1.2 \text{ ps}$ ^[13]。因为主板表面的覆铜

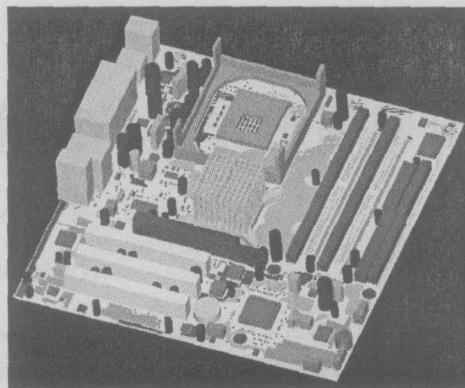
* 收稿日期:2005-09-12; 修订日期:2006-02-27

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:刘长军(1973-),男,河北邢台人,博士,教授,主要从事电磁场与微波技术的研究; qiliu@scu.edu.cn



(a) photo of a motherboard



(b) model of the motherboard

Fig. 1 Photo and model of a general purpose computer motherboard

图 1 一款通用型计算机主板

板厚度 $h \approx 0.02 \text{ mm}$, 远小于 FDTD 网格尺寸 Δz , 所以将覆铜板作为垂直于 z 方向的薄金属层进行计算。如果覆铜板的电导率为 σ_{Cu} , 在计算 xoy 平面内的电场 E_x 时, 对常规 FDTD 的算法进行修正以得到差分计算公式

$$E_x^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j, k) = \frac{2\epsilon_{\text{eff}}(i + 1/2, j, k)\Delta z - h\sigma_{\text{Cu}}\Delta t}{2\epsilon_{\text{eff}}(i + 1/2, j, k)\Delta z + h\sigma_{\text{Cu}}\Delta t} E_x^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j, k) + \frac{2\Delta t}{2\epsilon_{\text{eff}}(i + 1/2, j, k)\Delta z + h\sigma_{\text{Cu}}\Delta t} (\nabla \times \mathbf{H})_x |_{i+1/2, j, k} \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{\text{eff}}(i + 1/2, j, k)$ 为该点的等效介电常数; $(\nabla \times \mathbf{H})_x |_{i+1/2, j, k}$ 为该点磁场强度旋度按照常规 FDTD 算法的有限差分格式展开公式; 类似地可以得到电场 E_y 的差分格式计算公式。其他各电磁场量的计算公式与常规 FDTD 算法相同。

吸收边界条件选用占用内存少的 Liao 氏吸收边界条件。Liao 氏吸收边界是一种基于插值方法和波动方程得到的吸收边界条件, 可以方便地处理 3 维边界中的棱边和顶点^[14-15]。在 x 方向上, Liao 氏吸收边界表示为

$$\Phi(x, t + \Delta t) = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_N^j \Phi[x - jc\Delta t, t - (j-1)\Delta t] \quad (2)$$

式中: Φ 表示沿 x 方向传播的电场或者磁场; 系数 $C_N^j = N! / j!(N-j)!$; c 为真空中的光速; N 为吸收边界的阶数。公式中涉及到的 $t - (j-1)\Delta t$ 时刻的场值 Φ 需要额外存储, 阶数 N 越高则需要存储前时刻的场值越多。空间位置 $x - jc\Delta t$ 上的场值 Φ 不位于网格节点上, 需要通过 x 方向的插值计算得到。

在 FDTD 仿真计算中, 分别使用不同频率、不同角度的时谐平面电磁波作为辐射计算机主板的激励源, 得到计算机主板耦合电磁场的分布, 可以对电磁辐射影响计算机主板作出效应评估。如果使用高斯脉冲平面电磁波辐射计算机主板, 还可以获得主板上采样点处耦合电压随频率变化的特性。在 FDTD 仿真计算中的系统结构如图 2 所示, 取主板正面的法向为 z 方向, 设定入射角 θ 为平面电磁波的波矢量 \mathbf{k} 与 z 方向的夹角, 主板周围使用四阶 Liao 氏吸收边界, 计算空间大小为 $281 \text{ mm} \times 281 \text{ mm} \times 66 \text{ mm}$ 。

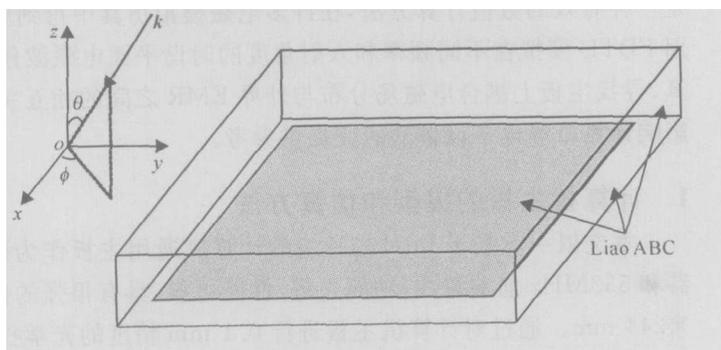


Fig. 2 Simulation system

图 2 模拟计算的系统结构

2 计算结果分析及讨论

采用上述主板模型并使用 FDTD 方法进行外界电磁辐射对计算机主板影响的仿真, 模拟计算主板前表面耦合的电磁场。设置平面电磁波的频率 $f = 7.2 \text{ GHz}$, 功率密度为 1.33 mW/m^2 , 仿真计算当平面电磁波入射角 θ 分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和 90° 时, 计算机主板耦合的电场分布, 如图 3(a)~(d) 所示。图 3 的结果显示随着入射角度 θ 的增加, 主板耦合的电场强度不断下降。在 $\theta = 0^\circ$ 时, 主板上 CPU 插槽附近、南桥芯片等位置的电场强

度较高;而在 $\theta=90^\circ$ 入射时,主板边缘的电场强度较高。根据图 3 的结果可以定性评估电磁辐射对计算机主板的影响程度,电磁场垂直入射比平行入射时影响更大。

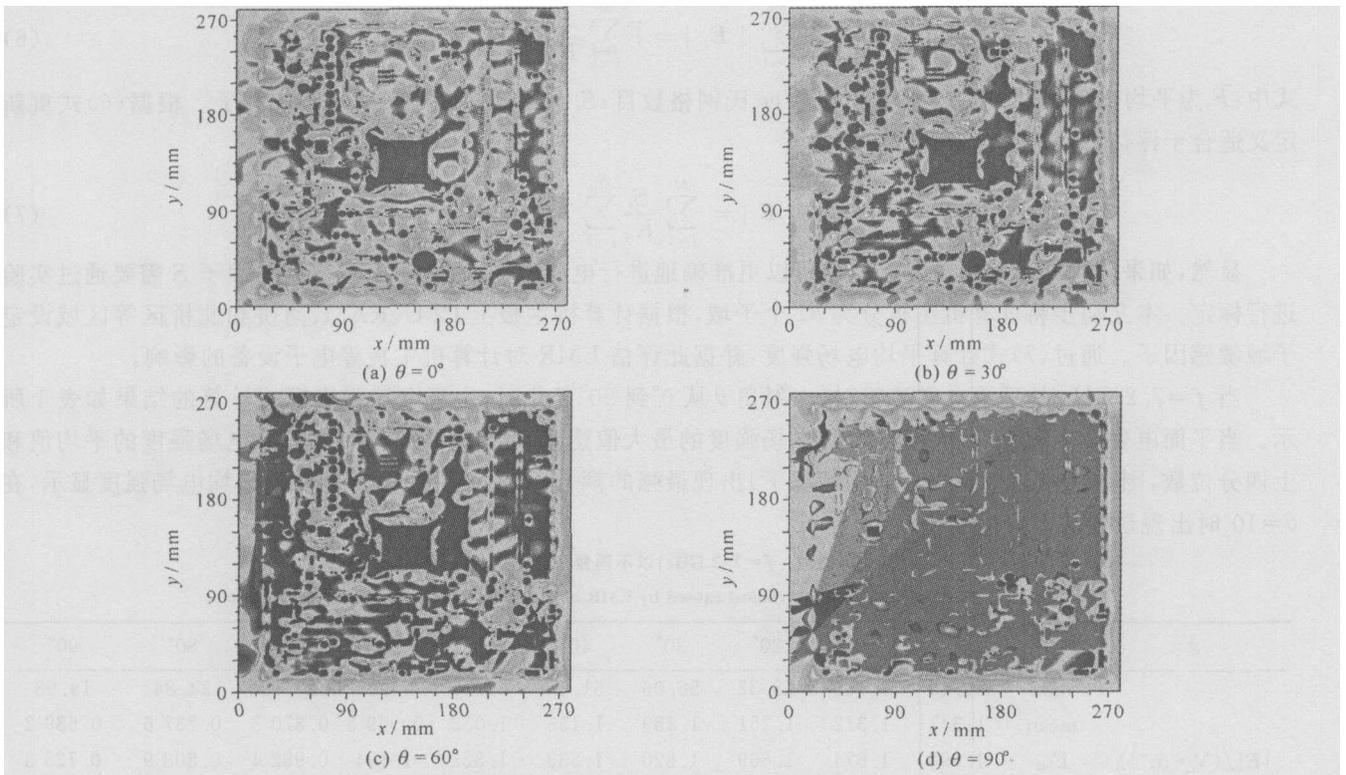


Fig. 3 Coupled electric field on the top surface of motherboard

图 3 主板前表面耦合的电场分布

为了能够定量地评估电磁辐射对计算机主板的影响,使用统计学方法处理主板表面电场强度。按照网格对主板前表面的电场强度顺序编号构成一个数据集,通过统计方法处理获得电场强度的最大值、平均值、标准方差、上四分位数等,从而可以进行定量的评估。电场强度模值的标准差 E_{SD} 表示为

$$E_{SD} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (|\mathbf{E}_i| - |\bar{\mathbf{E}}|)^2} \tag{3}$$

式中: K 为计算机主板前表面 FDTD 的 Yee 氏单元网格数目; $|\bar{\mathbf{E}}|$ 为平均电场强度模值; E_{SD} 表示电场强度分布的离散性。设 Q_U 为上四分位数(即第 75 百分位数 P_{75}),表示一个集合中有 25% 的元素大于该阈值,用于衡量具有较高场强值元素的分布情况。因此,使用平均值、标准差和上四分位数可以在一定程度上评估耦合电场对计算机主板的影响。

EMR 影响计算机主板,包括干扰数字信号的传输,造成 RAM 数据丢失,甚至高功率 EMR 会击穿或损伤计算机主板的半导体器件,最终导致计算机无法正常工作。这些影响都属于概率性事件,与计算机工作状态、器件的离散性、EMR 电场强度等多种因素相关。由于计算机主板元件众多,结构复杂,不同区域对电磁辐射敏感程度不同,因此影响计算机正常工作的概率也不同。将计算机主板分割为 M 个子域,第 i 个子域 Ω_i 在电磁辐射作用下耦合电场强度的平均值为 $|\bar{\mathbf{E}}|_{\Omega_i}$,导致计算机不能正常工作的概率为 P_i 。假设这些事件满足独立概率分布规律,则计算机主板不能正常工作的概率

$$P = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_i) \tag{4}$$

在计算机主板耦合电场强度较低条件下,得到第 i 个子域导致计算机不能正常工作的概率 $P_i \ll 1$ 。由于主板上干扰电压幅度与电场强度成线性关系,当干扰强度低并且子域划分足够小时 P_i 与该子域内的电场强度平均值近似为线性关系,简化(4)式为

$$P = \sum_{i=1}^M P_i = \sum_{i=1}^M F_i |\bar{\mathbf{E}}|_{\Omega_i} \tag{5}$$

式中: F_i 是子域 Ω_i 的概率因子。即使当计算机主板耦合的电场强度较高时,也可以使用(5)式作为概率 P 上限的参考值。如果使用概率因子的平均值进行归一化,可以将(5)式改写为

$$P = \overline{F} \sum_{i=1}^M \frac{F_i}{F} \frac{1}{K_i} \sum_{j=1}^{K_i} |E_j| = \overline{F} \sum_{i=1}^M \frac{S_i}{K_i} \sum_{j=1}^{K_i} |E_j| = \overline{F} |E| \quad (6)$$

式中: \overline{F} 为平均概率因子; K_i 为子域 Ω_i 的 Yee 氏网格数目; $S_i = F_i / \overline{F}$ 为子域 Ω_i 的敏感因子。根据(6)式重新定义适合于评估 EMR 效应的平均电场强度

$$|E| = \sum_{i=1}^M \frac{S_i}{K_i} \sum_{j=1}^{K_i} |E_j| \quad (7)$$

显然,如果分割的区域数 M 越大,就可以更准确地进行电磁辐射效应评估;子域敏感因子 S 需要通过实验进行标定。本文初步将计算机主板分为 81 个子域,根据计算机主板上 CPU、RAM、南桥和北桥区等区域设定子域敏感因子。通过(7)式计算平均电场强度,并据此评估 EMR 对计算机主板等电子设备的影响。

当 $f = 7.2 \text{ GHz}$ 的平面电磁波辐射,入射角 θ 从 0° 到 90° 变化时,主板电场强度模拟计算的结果如表 1 所示。当平面电磁波入射角度为 $\theta = 40^\circ$ 时,电场强度的最大值达到 61.55 V/m 。如果考虑电场强度的平均值和上四分位数,则在 $\theta = 0^\circ$ 时(垂直入射的情况下)出现最强的耦合电场。根据(7)式计算的平均电场强度显示,在 $\theta = 10^\circ$ 时出现最强的耦合电场。

表 1 平面电磁波 ($f = 7.2 \text{ GHz}$) 以不同角度辐射时的主板电场强度

Table 1 Electric field on motherboard caused by EMR at 7.2 GHz with different incident angle

θ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
max	56.15	60.66	58.32	56.06	61.55	52.38	53.85	40.49	24.84	19.98
mean	1.341	1.312	1.251	1.239	1.155	1.032	0.979 5	0.870 3	0.737 6	0.639 2
$ E / (\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$	E_{SD}	1.698	1.674	1.669	1.620	1.533	1.322	1.194	0.982 4	0.808 9
	Q_U	1.435	1.420	1.350	1.378	1.304	1.202	1.172	1.102	0.991 0
	mean *	2.886	2.938	2.686	2.510	2.273	2.065	2.024	1.531	1.091
										0.790

其中 mean * 为根据(7)式计算的平均电场强度。

表 2 中给出了计算机主板电场强度与 EMR 频率的关系。当平面波的入射角度固定为 $\theta = 0^\circ$ 时,得到的模拟计算结果。电场强度最大值出现在 $f = 3.6 \text{ GHz}$, 平均电场强度的最大值出现在 $f = 10.8 \text{ GHz}$, 而根据式计算平均电场强度的最大值出现在 $f = 8.4 \text{ GHz}$ 。

表 2 平面电磁波 ($\theta = 0^\circ$) 以不同频率辐射时的主板电场强度

Table 2 Electric field on motherboard caused by EMR with 0° incident angle at different frequency

f / GHz	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0
max	81.58	48.88	45.23	56.15	49.95	65.23	38.31	34.60
mean	1.143	1.123	1.148	1.341	1.343	1.415	1.513	1.436
$ E / (\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$	E_{SD}	1.709	1.598	1.385	1.698	1.671	1.615	1.575
	Q_U	1.256	1.222	1.284	1.435	1.455	1.575	1.712
	mean *	2.741	1.922	2.624	2.886	3.046	2.980	2.851
								2.759

其中 mean * 为根据(7)式计算的平均电场强度。

为了更好地分析、比较模拟计算结果,将表 1 和表 2 的数据绘制成图,如图 4(a)(b)所示。计算结果显示:(1)随着 EMR 入射角度 θ 的增加,耦合的电场强度趋于下降,电场强度分布的离散性趋于减小。当 $\theta = 0^\circ$ 时,平均电场强度达到最大值;当 $\theta = 40^\circ$ 时,电场强度达到最大值。(2)在模拟的频率范围内,当 $f = 3.6 \text{ GHz}$ 时,电场强度出现最大值;当 $f = 9 \text{ GHz}$ 左右时,根据(7)式计算的平均场强出现最大值。因此,如果考虑 EMR 的击穿作用,则在 $\theta = 40^\circ$ 和 $f = 3.6 \text{ GHz}$ 时,EMR 达到最强的效应;如果考虑 EMR 的信号干扰作用,则在 $\theta = 0^\circ$ 和 $f = 9 \text{ GHz}$ 附近时,EMR 具有最强的效应。

如果采用 Gauss 脉冲平面波入射,可以获得计算机主板宽频带的响应。通过设定采样点可以获得耦合电压幅度的频域特征。由于计算机主板结构的复杂性,模拟结果显示在一些频率点出现了谐振现象,很难预计主板上某个特定点耦合电压对频率响应的特征。因此,对 EMR 效应的评估要借助使用统计模型和概率模型来实现^[16-17]

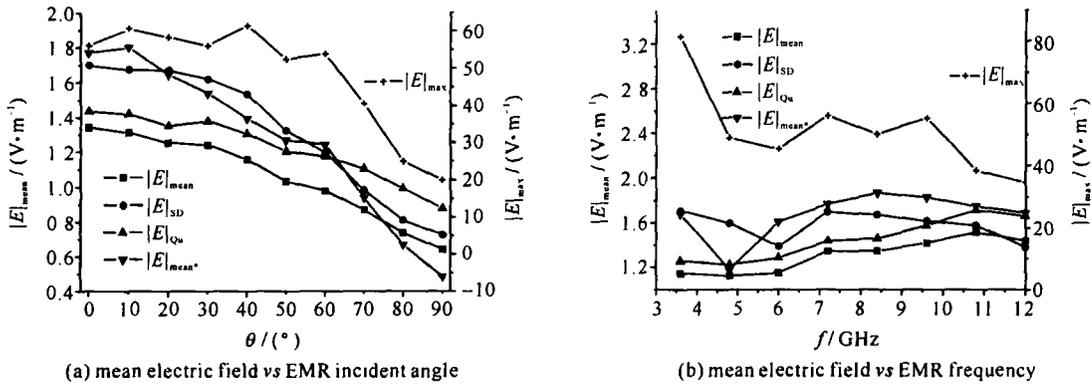


Fig. 4 Simulation results of coupled electric field

图 4 电场强度模拟计算结果

3 结论与展望

本文建立了一款计算机主板的模型,并使用 FDTD 方法模拟计算了 EMR 作用下主板耦合电场的分布,比较了不同入射角度和不同频率的 EMR 在主板上耦合电场强度的情况。根据本文提出的 EMR 效应评估方法,给出了具有最强效应的 EMR 的条件:入射角度 θ 为接近 0° 入射的情况,频率 f 为 3.6 GHz 或者 9 GHz 左右。

在今后的工作中,需要对计算机主板模型进行改进。使用更精细的网格,添加电源线、数据线、风扇等附件,使计算机主板模型与真实工作的计算机主板更为接近。本文所进行的模拟仿真中,主要考虑主板上的无源器件,对有源器件进行了简化处理。在实际应用中,EMR 在计算机主板上耦合电磁场分布的效应,与多种随机因素相关。如果要对 EMR 影响计算机主板做出效应评估,需要综合考虑入射角度、频率、主板结构、工作状态等多种因素,给出一个概率性的效应评估描述。

参考文献:

- [1] 张洪欣,吕英华,邱玉春,等. 计算机电磁信息泄漏阈值效应的研究[J]. 通讯学报, 2004, 25(10):87-92. (Zhang H X, Lü Y H, Qiu Y C, et al. Study of threshold effects of information leakage arising from computer. *Journal of China Institute of Communications*, 2004, 25(10):87-92)
- [2] National Security Agency Central Security Service. Tempest endorsement program [EB]. <http://www.nsa.gov/ia/industry/tempest/cfm?MenuID=10.2.7.2>
- [3] 刘长军,黄卡玛,胡仲霞,等. EMR 对混沌保密通信系统的初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(4):475-478. (Liu C J, Huang K M, Hu Z X, et al. Preliminary study on the interference of EMR to chaotic synchronous secure communication system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(4):475-478)
- [4] 黄卡玛,熊国安,刘永清,等. HPM 作用下 27 系列 EPROM 存储器失效的实验研究[J]. 电波科学学报, 1996, 11(4):45-49. (Huang K M, Xiong G A, Liu Y Q, et al. The experimental study of the series of 27-EPROM memory failure under the radiation of high power microwave. *Chinese Journal of Radio Science*, 1996, 11(4):45-49)
- [5] Gan F W, Zhou P B, Chen W Z. Analysis of shielding effectiveness using Finite Difference Time Domain method [C]// CCEA '99. Beijing, 1999:282-285.
- [6] 陈修桥,胡以华,张建华,等. 计算机机箱的电磁脉冲耦合模拟仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12):2786-2788. (Chen X Q, Hu Y H, Zhang J H, et al. Simulation of electromagnetic pulse coupling with computer box. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2004, 16(12):2786-2788)
- [7] 王锋,邹鹏,李彬,等. 计算机主板电磁泄漏的分析与测量[J]. 计算机工程, 2003, 29(15):153-155. (Wang F, Zou P, Li B, et al. Analysis and measurements of electromagnetic leakage from personal computer's motherboard. *Computer Engineering*, 2003, 29(15):153-155)
- [8] 郝桂友,刘光斌,袁会昌. 计算机电磁辐射的测量[J]. 测试技术学报, 2002, 16(2):140-143. (Hao G Y, Liu G B, Yuan H C. The measurement of computer electromagnetic radiation. *J of Test and Measurement Tech*, 2002, 16(2):140-143)
- [9] Naishadham K. Shielding effectiveness of conductive polymers [J]. *IEEE Trans on EMC*, 1992, 34(1):47-50.
- [10] Naishadham K, Berry J B, Hejase H. Full-wave analysis of radiated emission from arbitrary shaped printed circuit traces [J]. *IEEE Trans on EMC*, 1993, 35(3):366-377.
- [11] 王长清,祝西里. 电磁场时域有限差分法[M]. 北京:北京大学出版社, 1994. (Wang C Q, Zhu X L. FDTD method of electromagnetics. Beijing: Peking University Press, 1994)
- [12] 刘顺坤,陈雨生,孙蓓云,等. 电磁脉冲作用下地面铺设屏蔽电缆蒙皮电流分布的时域计算方法研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(2):283-286. (Liu S K, Chen Y S, Sun B Y, et al. Study of numerical method in time domain on a skin current of ground laying shielded cable excited by electromagnetic pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(2):283-286)

- [13] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. (Gao B Q. Finite-Difference Time-Domain method. Beijing: National Defense Industry Press, 1995)
- [14] 陈明阳, 黄丽芳, 于荣金. 基于 Liao 氏吸收边界条件的四阶 FDTD 算法[J]. 光子学报, 2000, **29**(9): 814-818. (Chen M Y, Huang L F, Yu R J. Four-order FDTD method based on Liao's absorbing boundary condition. Acta Photonica Sinica, 2000, **29**(9): 814-818)
- [15] Shao Z, Hong W, Zhou J. A generalized theory on the penetrating boundary condition[J]. Science in China (Series E), 2000, **43**(3): 275-281.
- [16] 赵翔, 黄卡玛, 陈星, 等. 雷电电磁场峰值的概率分布[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(2): 253-257. (Zhao X, Huang K M, Chen X, et al. Probability distribution of peak amplitude of lightning electromagnetic field. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(2): 253-257)
- [17] Zhao X, Huang K. Calculation of probability distribution of maximal received power of electronic receiver in lightning electromagnetic environment[J]. J of Electromagnetic Waves and Applications, 2005, **19**(2): 221-230.

Simulation and effect evaluation of electromagnetic radiation on computer motherboard

LIU Changjun, HUANG Kama, YAN Liping, PU Tianle, ZHANG Wenfu

(College of Electronics Science and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: An electromagnetic radiation (EMR) effect evaluation method is presented in this paper. The effect is ranked by the weighted average of the coupled electric field with domain decomposition and subdomain sensitive factors. Meanwhile, a facilitated electromagnetic model of a general purpose computer motherboard is built. Numerical simulation based on the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method is performed and the coupled electromagnetic field of the motherboard is achieved. EMR with incident angle from 0° to 90° at frequency from 3 GHz to 12 GHz is simulated and their effects are compared based on the developed evaluation method. Numerical results show that: (a) The larger the EMR incident angle is, the weaker the EMR effect is. The maximum weighted average of electric field is obtained when the incident angle is 10° . (b) The EMR effect on motherboard is not obviously dependent on its frequency. (c) The maximum coupled electric field on the motherboard is obtained when the EMR incident angle is 40° . A higher EMR frequency leads to a weaker maximum coupled electric field on the motherboard.

Key words: EMC; Electro magnetic coupling; Computer motherboard; Electro magnetic radiation; Evaluation; Numerical simulation