

# 导体板上单极天线对电磁脉冲响应特性的矩量法分析\*

杨雨川, 谭吉春, 盛定仪, 杨 耿

(国防科学技术大学 理学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 针对应用广泛的单极天线, 基于矩量法分析了天线对高空电磁脉冲和高功率微波、超宽带非核电磁脉冲的响应, 计算了三类电磁脉冲通过天线耦合产生感应电流频谱响应和时域瞬态响应, 窄带脉冲的响应曲线与入射脉冲有较大相似性, 电流响应峰值依次为 100, 60 和 10.3 A, 对现有大功率限幅器的功率容限提出了更高的要求。

**关键词:** 电磁脉冲; 单极天线; 矩量法; 感应电流; 过流防护

**中图分类号:** O442 **文献标识码:** A

高功率电磁脉冲已经严重威胁到电子设备和系统的安全<sup>[1]</sup>, 前门通道和后门通道是电磁脉冲能量进入电子设备的两种途径。天线作为主要的前门通道, 如果入射电磁脉冲能量的主要频谱分量在天线频带内, 大部分电磁脉冲能量将耦合到内部电子系统中, 造成对内部系统的干扰和破坏。因此研究天线对电磁脉冲的响应特性, 对天线接收端的电磁脉冲防护具有非常重要的现实意义。

单极天线结构简单, 应用广泛, 常用于如车载天线、机载天线、移动收发电台等。而矩量法(MOM)在计算天线远场、近场和激励电流参量时, 具有灵活性和精确性, 特别是在应用于天线的分析计算时, 可精确计算单极天线对外部空间场强的响应特性。本文基于矩量法, 分析和计算了单极天线对高功率微波(HPM)、超宽带(UWB)非核电磁脉冲和高空电磁脉冲(HEMP)在时域和频域上的电流响应特性, 并对目前广泛使用的前门通道加固装置的防护性能进行分析。

## 1 天线模型及其矩量法分析

天线结构如图 1 所示, 模型中单极天线视为细导线, 导体板视为理想导体。在理想导体板上满足切向电场连续条件  $\hat{n} \times (\mathbf{E}_{\text{inc}} + \mathbf{E}_e) = 0$ , 其中  $\hat{n}$  表示导体表面法向量,  $\mathbf{E}_{\text{inc}}$  表示入射场,  $\mathbf{E}_e$  表示在金属面感应电流激发场, 可表示为

$$E_{\text{inc}}(\mathbf{r})_{\text{tan}} = -E_{e,\text{tan}} = jk\eta \int_S J(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS' + \frac{j\eta}{k} \int_S \nabla' \cdot J(\mathbf{r}') \nabla G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS' \quad (1)$$

式中:  $k$  为波数;  $\eta$  为真空波阻抗;  $J(\mathbf{r}')$  为表面电流密度;  $j$  为虚数单位。  $\mathbf{r}$  和  $\mathbf{r}'$  分别为场点  $(x, y, z)$  和源点  $(x', y', z')$  的位置矢量。  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  为 3 维空间格林函数, 表示为

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{\exp[-jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|]}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \quad (2)$$

定义算子  $L_{\text{op}}$ , 将式(1)改写为  $L_{\text{op}}(J) = E_{\text{inc}}$  (以下  $E_{\text{inc}}$  均表示导体表面切面分量入射场)。表面电流密度  $J$  为待求函数, 求解过程中, 需要计算广义矩量  $\langle J, E_{\text{inc}} \rangle$  沿导体表面  $J \cdot E_{\text{inc}}$  的积分。选择基函数展开电流密度, 本文分别采用  $\delta$  函数, RWG 基函数和连接域基函数展开线电流密度  $J_1(l)$ , 面电流密度  $J_g(r)$  和面线连接域电流密度  $J_p$ , 具体表达式参见文献[2], 不同位置电流的分域基函数展开式为

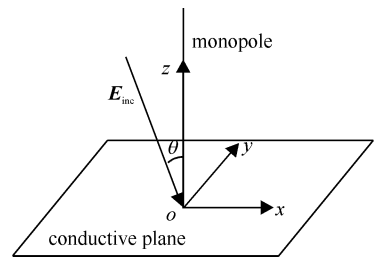


Fig. 1 Model of monopole on conductive plane  
图 1 导体板上单极天线模型

\* 收稿日期: 2007-06-29; 修订日期: 2008-03-05

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题(51421-KG0152)

作者简介: 杨雨川(1983—), 男, 硕士, 从事光学技术与微波兼容和防护的相关工作; yyc\_online@126.com。

$$J = \sum_n I_n f_n \quad (3)$$

式中:  $I_n$  是电流展开系数。当  $J$  分别为线电流密度、面电流密度、面线连接域电流密度时,  $f_n$  对应其各自基函数的表达式。将式(3)代入式(1)中,采用伽略金法,令检验函数等于电流密度函数,得到矩阵方程<sup>[2]</sup>

$$\sum_{n=1}^N I_n Z_{mn} = V_m \quad (m = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中: 广义阻抗  $Z_{mn} = \langle f_n, L_{op}(f_m) \rangle$ ; 广义电压  $V_m = \langle f_m, E_{inc} \rangle$ 。求解该矩阵方程就可得到线上、面上和线面连接域处的电流展开系数,进而得到复杂目标模型的感应电流分布<sup>[2-3]</sup>。

## 2 3 种电磁脉冲的数学描述

HEMP 辐射电场可以用双指数波形来近似,表示为

$$E_{inc}(t) = E_0 [\exp(-at) - \exp(-bt)], \quad t \geq 0 \quad (5)$$

式中:  $E_0$  为电场峰值;  $a = 4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ;  $b = 6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ; 波形上升沿时间  $t_r = 2.5 \text{ ns}$ , 脉冲半宽度  $\tau_{1/2} = 23 \text{ ns}$ 。

HPM 辐射电场可近似表示为<sup>[4]</sup>

$$E_{inc}(t) = \begin{cases} E_0 \frac{t}{t_1} \sin(2\pi f_0 t), & 0 < t < t_1 \\ E_0 \sin(2\pi f_0 t), & t_1 \leq t < t_1 + \tau \\ E_0 \left( \frac{\tau + 2t_1}{t_1} - \frac{t}{t_1} \right) \sin(2\pi f_0 t), & t_1 + \tau \leq t < 2t_1 + \tau \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\tau$  为脉冲宽度,取  $50 \text{ ns}$ ;  $t_1$  为脉冲上升时间和衰落时间,取  $10 \text{ ns}$ ;  $f_0$  为载波频率,取  $3 \text{ GHz}$ 。

UWB 辐射电场用微分 Gaussian 脉冲近似

$$E_{inc}(t) = E_0 C \frac{t - t_0}{\tau} \exp\left[-\frac{4\pi(t - t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (7)$$

式中:  $C = \sqrt{8\pi} \exp(1/2)$ ;  $\tau = 1 \text{ ns}$ ;  $t_0$  为时间常数,取  $1 \text{ ns}$ 。3 种脉冲场强峰值均取  $50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。图 2 给出了 3 种脉冲的时域波形图。

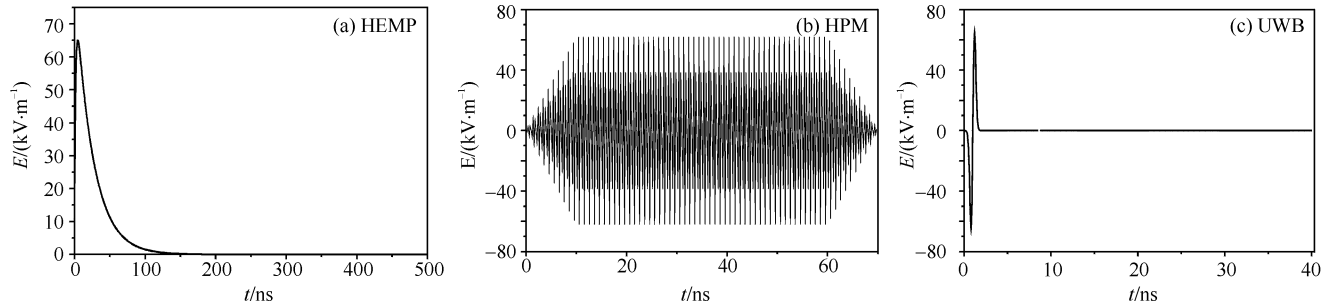


Fig. 2 Curves of three incident impulses

图 2 3 种入射脉冲曲线

## 3 响应特性计算结果及分析

设图 1 中单极天线半径为  $1 \text{ mm}$ , 长度为  $1 \text{ m}$ , 导体板尺寸远大于天线尺寸, 入射平面波垂直极化, 入射仰角  $\theta = 45^\circ$ , 入射方向角  $\varphi = 0^\circ$ 。计算得到天线末端在 3 种电磁脉冲 HEMP, HPM 和 UWB 作用下感应电流的频域波形, 如图 3(a)、4(a) 和 5(a) 所示 (纵坐标用归一化幅度表示), 傅里叶逆变换得到对应的电流时域波形, 如图 3(b)、4(b) 和 5(b) 所示。

为了说明所选理论模型的可行性和准确性, 图 3(b) 中还给出入射脉冲为 HEMP 时基于 FDTD 全 3 维电磁场模拟软件 Fidelity 的仿真结果 (仿真条件与本文计算条件相同), 从图中可以看出两种方法的计算结果非常接近, 说明所选模型对于处理类似电磁脉冲作用下导体板上单极天线的感应电流准确可行。

据图 3~5 的波形可得到以下结论: 感应电流的频谱分量主要由入射电磁脉冲频谱决定, 单极天线对 HEMP 辐射场的感应电流集中在低于  $100 \text{ MHz}$  的低频分量; 对 HPM 辐射场的感应电流集中在  $3 \text{ GHz}$  的高频分量; 对 UWB 辐射场的感应电流存在于宽频带范围内。感应脉冲波形与入射脉冲波形接近, 但由于导线上

端和导线与导体板连接点存在感应反射电压波,导致电流响应波形产生振荡。对 HEMP 的感应电流峰值最高达到 100 A,远大于其它两类电磁脉冲的感应电流峰值,其中,HPM 和 UWB 的感应电流峰值较小,分别为 60 和 10.3 A;3 种脉冲响应上升沿时间( $0.1I_{\max} \sim I_{\max}$ )近似,约为 2 ns。显而易见,上百 A 的感应电流超过了大部分元器件物理损伤阈值,数 A 级的感应电流也将严重影响后继电子系统的正常工作状态,具体的损伤量级对不同系统需要作进一步的评估。在感应电流传递给  $50 \Omega$  阻抗的情况下,时域积分公式为

$$W_1 = R_1 \int_t I_1(t) I_1^*(t) dt \tag{8}$$

式中: $R_1$  表示电阻阻值; $I_1(t)$  表示随时间变化的电流函数,“ $*$ ”为共轭符号。积分得到脉冲波形在负载上,沉积的能量依次为 28.9,8.1 和 0.03 mJ。为了防止电磁脉冲感应电流通过馈线进入系统,并由此造成内部电路器件状态翻转、器件性能下降和半导体器件的击穿等效应,有必要对天线的前门通道采取防护措施。

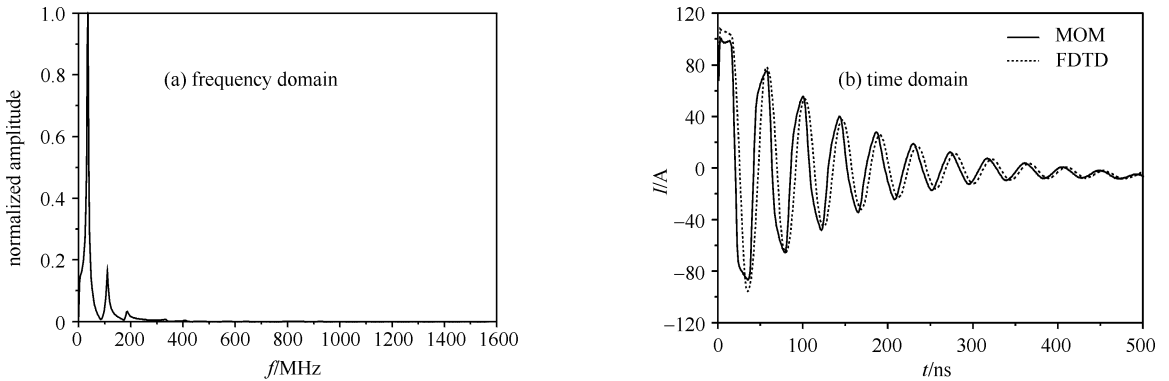


Fig. 3 Response in frequency and time domain of monopole exposed to HEMP

图 3 HEMP 作用下时域和频域响应曲线

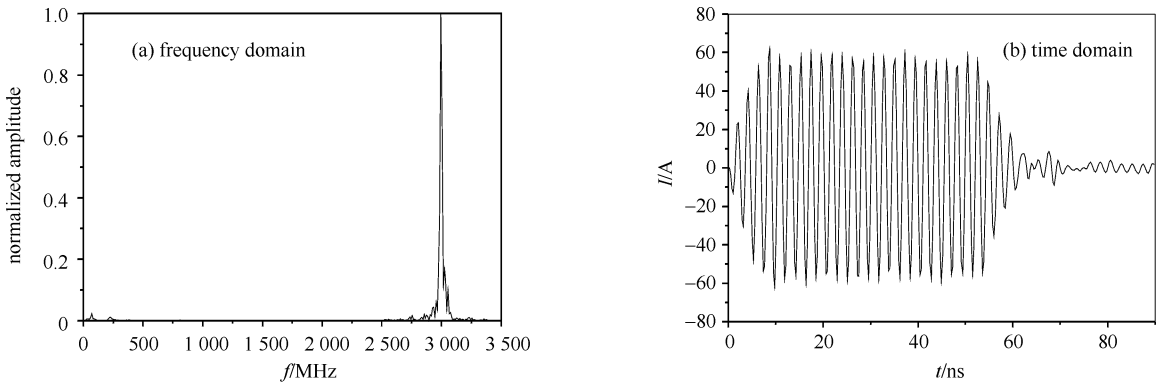


Fig. 4 Response in frequency and time domain of monopole exposed to HPM

图 4 HPM 作用下时域和频域响应曲线

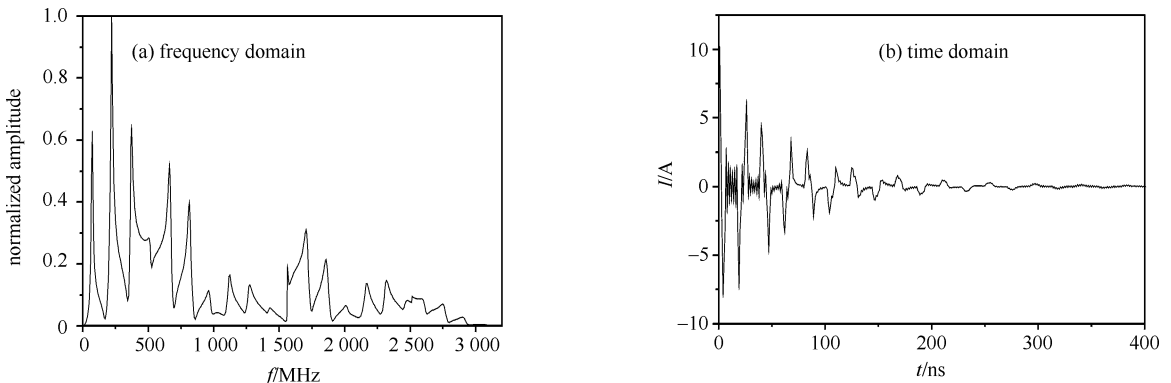


Fig. 5 Response in frequency and time domain of monopole exposed to UWB

图 5 UWB 作用下时域和频域响应曲线

目前在高功率脉冲的防护中,广泛采用大功率限幅器<sup>[5]</sup>,实用化的大功率限幅器可承受 200 kW 峰值功

率。根据计算结果,100 A 的感应电流在 50  $\Omega$  阻抗上可产生数百 kW 的峰值功率,因此对该种器件的功率容限参数提出了更高的要求。同时,积极探索新材料和新原理大功率限幅器件和装置,如钙钛矿型限幅器<sup>[6]</sup>和等离子体限幅器装置<sup>[7]</sup>等,在电磁脉冲对抗中发挥更加重要的作用。

## 4 结 论

本文通过矩量法方法,计算了导体板上单极天线在 3 种电磁脉冲作用下的感应电流波形。通过计算结果可以看出,场强峰值为 50  $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$  的 HEMP,HPM 和 UWB 可使理想导体板上单极天线产生数十 A 到百 A 的感应电流,该电流将会对后继电子系统造成严重威胁,因此必须采取防护措施。同时,计算发现入射脉冲带宽越窄,单极天线的响应波形越近似于入射脉冲波形,因此可以通过入射脉冲的频谱分布简要判定响应波形的相关参数。对于其它复杂天线结构,也可以采用类似的方法分析电磁脉冲作用下的感应电流,为采取防护措施和防护器件性能选择上提供参数依据。

## 参考文献:

- [1] Li H, Wang Z B. Development of foreign high-powered microwave weapons and prospect of future application in space-based target defense and air defense[R]. ADA306465,1996.
- [2] Tekin I H, Newman E H. Method of moment solution for a wire attached to an arbitrary faceted surface[J]. *IEEE Trans Ant and Prop*, 1998,**46**(4):559-562.
- [3] Tesche F M, Tesche F M, Ianoz M V, et al. EMC analysis methods and computational models[M]. New York:Wiley,1997.
- [4] 陈海林,陈彬,李正东,等. 电磁脉冲作用下自由空间线缆的感应开路电压[J]. *强激光与粒子束*, 2006,**18**(1):93-96. (Chen H L,Chen B,Li Z D,et al. Induced open-circuit voltage of cables exposed to electromagnetic pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006,**18**(1):93-96)
- [5] 刘国靖,潘泉,刘国治,等. 雷达接收机保护技术进展[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*,2004,**28**(5):665-671. (Liu G J,Pan Q,Liu G Z, et al. Radar receiver protection techniques;the state of the arts. *Journal of Xidian University(Nature Science Edition)*, 2004,**28**(5):665-671)
- [6] Altgilbers L,Balevius S,Kiprijanovi O,et al. Fast protector against EMP using electrical field induced resistance change in  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  thin films[C]//Proc of IEEE Pulsed Power Plasma Science. 2001:545-548.
- [7] Patel S D,Dubrowsky L D, Sadow S E,et al. Microstrip plasma limiter[J]. *IEEE MTT-S Digest*, 1989,(7):879-882.

# Response characteristics and protection techniques of monopole on conductive plane exposed to electromagnetic pulse

YANG Yu-chuan, TAN Ji-chun, SHENG Ding-yi, YANG Geng

(School of Science, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Based on the widely used monopole on conducting plane,the response characters of antenna exposed to high electromagnetic pulse,high power microwave and ultra wideband electromagnetic pulse were analysed by moment method,and the time domain and frequency domain response waveforms of the three types electromagnetic pulse coupled to the antenna was calculated. The monopole response waveform of the narrowband pulse is much similar to the incident waveform,the peak current is 100 A,60 A and 10.3 A ordinally,boosting the demand for higher power capacity of the actual high power limiters.

**Key words:** Electromagnetic pulse; Monopole; Moment method; Induced current; Overload protection