

电磁脉冲作用下自由空间线缆的感应开路电压*

陈海林¹, 陈 彬¹, 李正东², 段艳涛¹

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007; 2. 炮兵学院南京分院, 南京 211132)

摘 要: 运用时域有限差分法结合基于 Kirchhoff 积分的近/远场变换, 计算了高功率微波(HPM)和超宽带(UWB)电磁脉冲作用下自由空间不同长度线缆上感应的开路电压, 分析了感应电压峰值和线缆长度之间的变化关系以及入射波波参数对其影响。计算结果表明, 辐射场电场强度为 $50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 的 HPM 和 UWB 作用在线缆上可以感应出几百 V 到数十 kV 的脉冲电压; 感应电压的峰值与线缆长度之间并不是单调线性增加的关系; HPM 的载频越高, 感应电压峰值越小; UWB 的脉冲宽度越宽, 感应电压峰值越大。

关键词: 时域有限差分; 电磁脉冲; 感应电压; 超宽带

中图分类号: O441 文献标识码: A

高功率微波(HPM)、超宽带(UWB)等非核电磁脉冲^[1-3]产生的电磁脉冲辐射可以对电子设备和系统造成严重的干扰和破坏。实验表明, 电力、电子系统中的导线、电缆是引入电磁干扰的重要途径。本文运用时域有限差分法^[4]结合基于 Kirchhoff 积分的近/远场变换, 对高功率微波和超宽带电磁脉冲作用下自由空间不同长度线缆引入的电压干扰(感应开路电压)进行了全波分析, 研究了感应电压峰值和线缆长度之间的变化关系以及波形参数对感应电压峰值的影响, 为确定干扰的量级和典型波形并进一步采取相应的防护措施提供了依据。

1 基于 kirchhoff 积分的近/远场变换

用时域有限差分法从场的角度计算线缆感应开路电压是通过对电场的线积分来实现的, 这就需要用到远区场, 远区场一般通过近/远场变换得到。近/远场变换可以分为三种。一是基于 Huygen's 等效原理^[5,6]; 二是基于 Stratton-Chu 积分^[7,8]; 三是基于 Kirchhoff 积分^[9,10]。前两种方法计算某一远场分量要用到积分面上的所有近场分量, 且实现复杂; 后一种方法计算某一远场分量只用到与之相同的近场分量, 并在时域直接计算, 实现简单。下面以 E_x 为例介绍基于 Kirchhoff 积分的近/远场变换(Kirchhoff Surface Integral Representation, 简称 KSIR)的原理和算法实现。图 1 中, 对于观察点 P 处任意一个场分量 $\phi(\mathbf{r}, t)$ 有

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \int_S \{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) \left[\frac{\phi(\mathbf{r}', \tau)}{4\pi R^2} + \frac{1}{4\pi R c} \frac{\partial \phi(\mathbf{r}', \tau)}{\partial \tau} \right] - \frac{(\mathbf{n} \cdot \nabla) \phi(\mathbf{r}', \tau)}{4\pi R} \} dS \quad (1)$$

式中: $\tau = t - R/c$ 是计算 P 点的电磁场时所用到的闭合面上场量的对应时间, 它依赖于信号从闭合面上任意一点 Q 传播到 P 点所需要的时间, c 为光速。

$$E_x(\mathbf{r}, t) = \int_S \{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) \left[\frac{E_x(\mathbf{r}', \tau)}{4\pi R^2} + \frac{1}{4\pi R c} \frac{\partial E_x(\mathbf{r}', \tau)}{\partial \tau} \right] - \frac{(\mathbf{n} \cdot \nabla) E_x(\mathbf{r}', \tau)}{4\pi R} \} dS \quad (2)$$

S 可以是包含被研究对象的任意闭合面。在实际的 FDTD 运算过程中选择如图 2 所示的矩形闭合面, 积分用求和代替, 微分用相应的中心差分代替, 得到以下求和公式(以 $x = i_1$ 面为例)

$$E_x(P, t_{n+1} + \frac{R}{c}) = E_{x1}(n) + E_{x2}(n+1) + E_{x3}(n+2) \quad (3)$$

其中,

$$E_{x1}(n) = \sum_{j'k'} -\frac{\cos\theta'}{8\pi R c \Delta t} \frac{E_x^n(i_1 + 1/2, j', k') + E_x^n(i_1 - 1/2, j', k')}{2} \Delta j'k'$$
$$E_{x2}(n+1) = \sum_{j'k'} \left[-\frac{\cos\theta'}{4\pi R^2} \frac{E_x^{n+1}(i_1 + 1/2, j', k') + E_x^{n+1}(i_1 - 1/2, j', k')}{2} + \frac{1}{4\pi R} \frac{E_x^{n+1}(i_1 + 1/2, j', k') - E_x^{n+1}(i_1 - 1/2, j', k')}{\Delta x} \right] \Delta j'k'$$

* 收稿日期: 2005-05-30; 修订日期: 2005-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(50237040, 60471013); 教育部高等学校骨干教师资助计划项目
作者简介: 陈海林(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为计算电磁学、电磁防护; hylinchen@263.net。

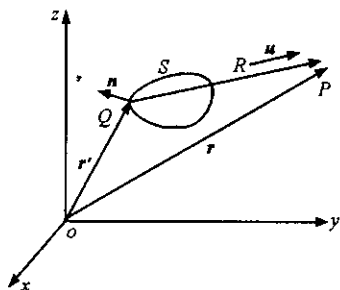
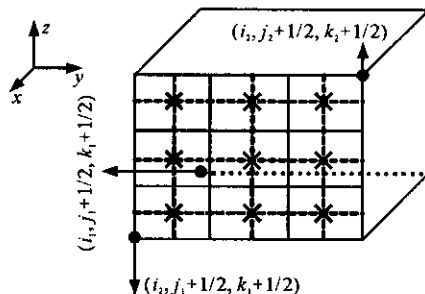


Fig. 1 Geometry for TF/SF transformation based on KSIR

图 1 基于 Kirchhoff 积分的近/远场变换示意图

Fig. 2 Integral surface for E_x 图 2 计算 E_x 选择的闭合面

$$E_{x3}(n+2) = \sum_{j'k'} \frac{\cos\theta'}{8\pi R c \Delta t} \frac{E_x^{n+2}(i_x+1/2, j', k') + E_x^{n+2}(i_x-1/2, j', k')}{2} \Delta j'k'$$

式中: θ' 是面积微元 $\Delta j'k'$ 的法线与该子面积中心到观测点 P 的矢量之间的夹角。令 $n^* = \text{int}[n + R/c\Delta t]$, 生成一个时间序列 $E_x = \{E_x(1), E_x(2), \dots, E_x(n^*), \dots\}$ 。在 $n+1$ 时刻计算 E_{x1}, E_{x2}, E_{x3} , 并将其分别加到 $E_x(n^*+2), E_x(n^*+1), E_x(n^*)$ 。对每一个子面积 $\Delta j'k'$ 重复以上计算。同样对于其它 5 个平面也是一样。当所有计算完成后, 观测点处的 E_x 就得到了。

2 高功率微波和超宽带电磁脉冲的数学描述

HPM 辐射电场可以近似表示为

$$E_i(t) = \begin{cases} E_0 \frac{t}{t_1} \sin(2\pi f_0 t), & 0 < t < t_1 \\ E_0 \sin(2\pi f_0 t), & t_1 \leq t < t_1 + \tau \\ E_0 \left(\frac{\tau + 2t_1}{t_1} - \frac{t}{t_1} \right) \sin(2\pi f_0 t), & t_1 + \tau \leq t < 2t_1 + \tau \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_0 为电场峰值; τ 为脉冲宽度; t_1 为脉冲上升时间和衰落时间, f_0 为载波频率。

UWB 辐射电场用微分 Gauss 脉冲近似

$$E_i(t) = E_0 k(t - t_0) \exp\left[-\frac{4\pi(t - t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (5)$$

式中: $k = e^{0.5} \sqrt{8\pi}/\tau$; E_0 为电场峰值; τ 为脉冲宽度, t_0 为时间常数。两种脉冲电场峰值均取 $50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

3 数值计算结果及分析

如图 3 所示, 自由空间线缆导体半径为 5 mm , 入射波垂直极化, 入射角 $\theta = 0^\circ, \phi = 90^\circ$, 电场矢量平行于线缆轴线。感应开路电压用下式计算

$$U = \int_{P_1}^{\infty} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (6)$$

其中, P_1 为线缆一端点。实际上, 由于散射场在几 m 范围内迅速衰减, 只要在有限的区域对电场积分就可以得到感应电压的近似值。

图 4(a) 为 HPM 作用下不同长度线缆感应开路电压

的时域波形。HPM 的载波频率为 $f_0 = 3 \text{ GHz}$, 脉冲宽度 $\tau = 50 \text{ ns}$, 上升时间和衰落时间均为 $t_1 = 10 \text{ ns}$ 。可以看出, 线缆上感应的总电压是直接感应电压(由入射波直接产生)和线缆终端电压反射波二者叠加的结果。随着线缆长度的增加, 电压反射波到达的时间增加; 当线缆达到一定的长度后, 电压反射波脉冲滞后于直接感应电压脉冲, 这时线缆长度继续增加, 感应电压第一个脉冲的波形和峰值不再变化, 其脉冲形状和入射波的波形非常接近。图 4(b) 是脉宽为 1 ns 的 UWB 作用下不同长度线缆感应开路电压的时域波形。

图 5 是不同载频 HPM 作用下感应电压峰值和线缆长度的变化关系。当线缆长度很短时, 可以看作是一

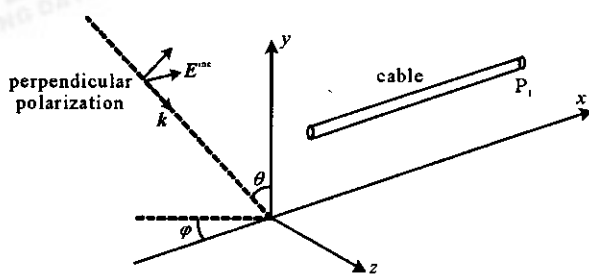


Fig. 3 Cable in Cartesian coordinates

图 3 线缆与入射波方位图

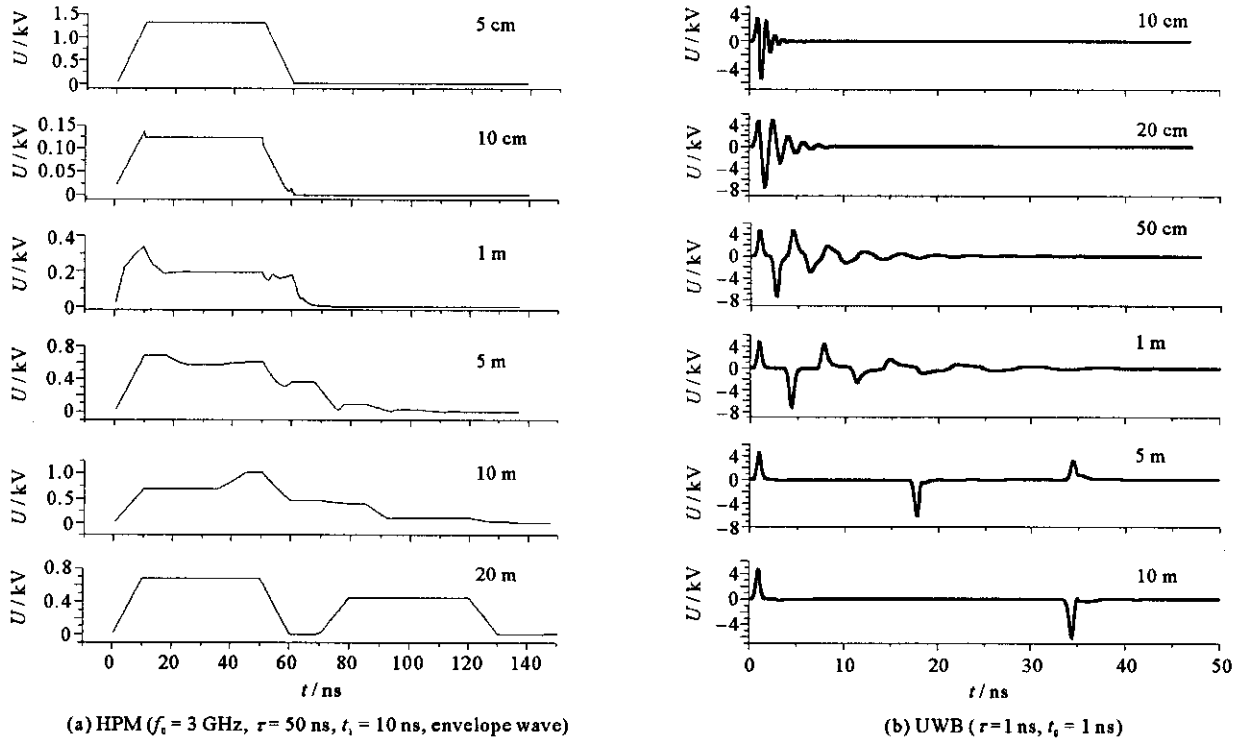


Fig. 4 Induced open-circuit voltage of cable with different length

图 4 不同长度线缆开路感应电压的时域波形

副偶极子天线,随着其长度的增加感应电压增大。当线缆长度为 HPM 载频 f_0 对应波长的二分之一时,线缆可视为半波振子天线,感应电压峰值达到最大值。线缆长度继续增加,感应电压峰值开始减小,这时的电压峰值取决于线缆终端电压反射波的到达时刻。由于 HPM 载波为周期性变化的正弦波,随着线缆长度增加电压反射波与直接感应电压有时同相有时反相,二者叠加表现为电压峰值起伏变化。当线缆长度达到一定长度以后,感应电压峰值逐渐饱和。另外,HPM 的载频越高,感应电压的峰值越小。

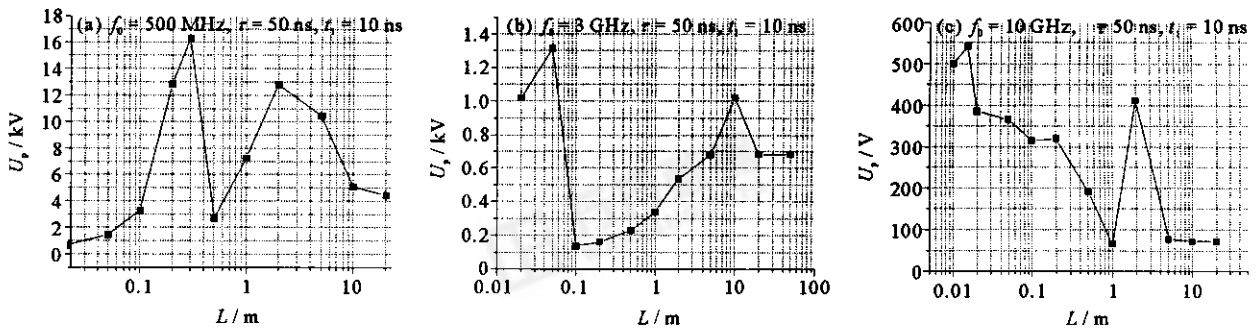


Fig. 5 Voltage peak value vs cable length when exposed to HPM

图 5 HPM 作用下线缆上感应开路电压峰值 U_p 随导线长度 L 的变化曲线图

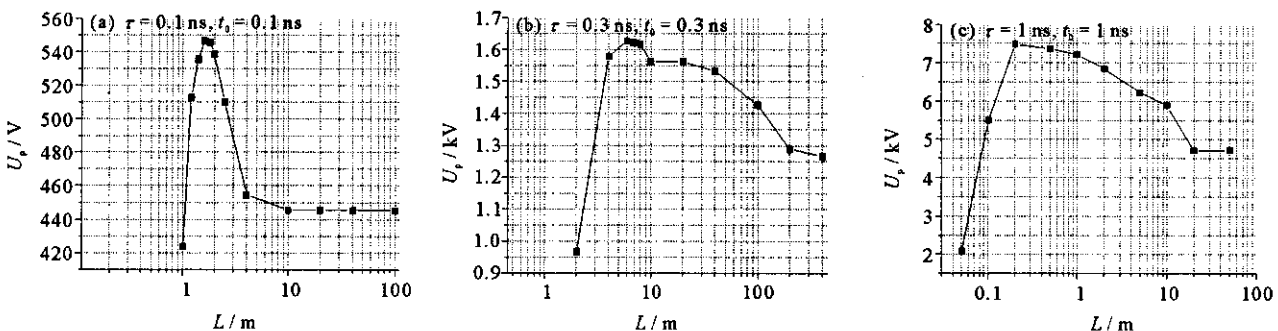


Fig. 6 Voltage peak value vs cable length when exposed to UWB

图 6 UWB 作用下线缆上感应开路电压峰值 U_p 随导线长度 L 的变化曲线图

图 6 是不同脉宽 UWB 作用下感应电压峰值和线缆长度的变化关系。和 HPM 的计算结果相比,基本规律是一致的。主要区别:一是即使线缆终端电压反射波滞后于直接感应电压脉冲,感应电压的第一个脉冲的波形和 UWB 入射波波形的差别也很大。二是电压峰值随线缆长度的变化关系不同。随着线缆长度的增加,感应电压峰值逐渐增大,当其长度达到 UWB 主频对应波长的二分之一时,电压峰值达到最大值,然后开始减小,最终趋于饱和,期间没有出现类似 HPM 那样的起伏振荡。另外,UWB 的脉冲宽度越窄,感应电压峰值越小。

4 结 论

通过本文计算结果和分析可以看出,场强为 $50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 的 HPM 和 UWB 作用在自由空间线缆上可以感应出几百 V 到数十 kV 的脉冲电压。感应电压的峰值与线缆长度之间并不是单调线性增加的。当线缆长度接近于入射波主频对应波长的二分之一时,开路电压峰值最大。线缆长度达到一定值后,电压峰值趋于饱和。另外,HPM 的载频越高,感应开路电压越小;UWB 的脉冲宽度越宽,开路电压越大。

参考文献:

- [1] 周璧华,陈彬,高成. 现代战争面临的高功率电磁环境分析[J]. 微波学报, 2002, **18**(1):88-92. (Zhou B H, Chen B, Gao C. Analysis on high power electromagnetic environment in modern war. *Journal of Microwaves*, 2002, **18**(1):88-92)
- [2] 方进勇,刘国治,李平,等. 高功率微波脉冲宽度效应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(5):639-643. (Fang J Y, Liu G Z, Li P, et al. Experimental study of the high power microwave pulse width effect. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5):639-643)
- [3] 孟凡宝,马弘舸,周传明,等. 1 GW 超宽带单周期脉冲辐射源实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(4):473-477. (Meng F B, Ma H G, Zhou C M, et al. Experimental investigation of 1 GW single periodic ultra-wide band pulse radiation source. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(4):473-477)
- [4] Taflove A. Computational electro-dynamics; the finite-difference time-domain method[M]. London: Artech House, 1995.
- [5] Luebbers R J, Kunz K S. A finite-difference time-domain near zone to far zone transformation[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1991, **39**(4):429-433.
- [6] Martin T. An improved near-to far-zone transformation for the finite-difference time-domain method[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1998, **46**(9):1263-1271.
- [7] Shlager K L, Smith G S. Near-field to near-field transformation for use with FDTD method and its application to pulsed antenna problems [J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(16):1262-1264.
- [8] Shlager K L, Smith G S. Comparison of two FDTD near-field to near-field transforms applied to pulsed antenna problems[J]. *Electronics Letters*, 1995, **31**(12):936-938.
- [9] Ramahi O M. Near-and far-field calculations in FDTD simulations using Kirchhoff surface integral representation[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1997, **45**(5):753-759.
- [10] 张光甫,刘培国,谭怀英,等. 基于基尔霍夫积分的近远场变换的改进[J]. 电波科学学报, 2000, **15**(3):339-342. (Zhang G F, Liu P G, Tan H Y, et al. Improved near to far-field transformation based on Kirchhoff integral in FDTD simulation. *Chinese Journal of Radio Science*, 2000, **15**(3):339-342)

Induced open-circuit voltage of cables exposed to electromagnetic pulse

CHEN Hai-lin¹, CHEN Bin¹, LI Zheng-dong², DUAN Yan-tao¹

(1. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA university of Science and Technology, Nanjing 210007, China;*

2. *Artillery Institute Nanjing Branch, Nanjing 211132, China)*

Abstract: The FDTD method and near-to far-field transformation based on Kirchhoff integral were used to calculate the induced open-circuit voltage of cables in free space exposed to HPM and UWB pulse. The influence of the parameters of incident waveform and the relation between the peak value of induced voltage and the length of cable were analyzed. The numerical results indicate that the induced voltage varies with the length of cable and the parameters of incident waveform. Variation of induced voltage peak value is not linear with the length of cable. When the length of cable reaches certain value, it is found that the induced voltage has a maximum peak value. With the electric field intensity of $50 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, the peak value of induced voltage can come to several hundred volts even to several ten kilovolts. The peak voltage value is in inverse proportion to the carrier frequency of HPM and in direct proportion to the UWB pulse width.

Key words: Finite-difference time-domain; Electromagnetic pulse; Induced voltage; Ultra-wide-band pulse