

文章编号: 1001-893X(2011)01-0098-06

垂直入射 HEMP 近地面电磁环境特性研究*

柴焱杰¹, 孙继银¹, 王佰年¹, 孙东阳²

(1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘 要: 高空核爆电磁脉冲(HEMP)具有覆盖范围广、峰值场强高等特点, 对电子设备构成严重威胁。针对有关 HEMP 标准中主要涉及自由空间 HEMP 波形描述的情况, 研究了双指数 HEMP 平面波垂直入射地面时, 地面附近的电磁脉冲环境特性。基于时域有限差分(FDTD)法提出使用一维合成平面波解决总场空间激励源的引入问题。通过设置不同的入射波状态和环境因素, 仿真计算了 HEMP 在地面附近的电磁脉冲环境参数, 并对 HEMP 在地面附近的传播特点与规律进行了总结和归纳。结果表明, 较低位置处反射场削弱了部分入射场, 使总场幅度降低; 较高位置处经历较为完整的入射场和反射场的冲击; 地表介质的电气参数对总场也有影响, 其中电导率的影响较大。这些结论有利于指导地面附近电子设备的防护设计。

关键词: 高空核爆电磁脉冲; 地面; 电磁脉冲环境; 时域有限差分法; 电子设备; 防护设计

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.01.020

Study on Environment Characteristics near the Ground of Normal Incidence High-altitude Electromagnetic Pulse

CHAI Yan-jie¹, SUN Ji-yin¹, WANG Bai-nian¹, SUN Dong-yang²

(1. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) has the characteristics of a wide coverage and high peak field strength, which poses a serious threat to the electronic devices. But the current HEMP standards include only the general wave characteristics in the free space, so the electromagnetic environmental characteristics near the ground induced by the double-exponential HEMP incident plane wave perpendicular to the ground are studied in this paper. Based on the finite difference time domain(FDTD) method, the 1-D compound plane wave is proposed, which solves the introduction of stimulating source. The different incident wave statuses and environmental factors are set and the electromagnetic environmental parameters near the ground are simulated. Then, the propagation characteristics and trends of the HEMP near the ground are summarized and concluded. The results show that the reflected field weakens the incident one, which makes the total field depressed, especially in the lower position over the ground, and almost integer incident and reflected fields occur in the upper position. In addition, the ground electrical parameters also affect the total field near the ground, especially the conductivity. The conclusions are helpful to provide guidance for the protection design of electronic devices near the ground.

Key words: high-altitude electromagnetic pulse(HEMP); ground plane; environment of electromagnetic pulse; finite difference time domain(FDTD) method; electronic device; protection design

1 引 言

现代科技的进步促进了电子产品的微型化, 这在不断提高生产效益的同时, 也增加了高集成度电

子产品的敏感性。在电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)的定义中^[1], 电磁干扰的三要素是电磁骚扰源、耦合途径和敏感设备。近几十年来, 核电

* 收稿日期: 2010-11-11; 修回日期: 2010-12-13

电磁脉冲作为一种特殊的强电磁骚扰源,以其对敏感设备产生的巨大杀伤破坏作用而倍受人们的重视,在多个领域对其进行着不断深入的研究。高空核爆电磁脉冲(High-altitude Electromagnetic Pulse, HEMP)是指发生在30 km以上的高空核爆炸产生的电磁脉冲,具有覆盖范围广、场强峰值高等特点,是研究核电磁脉冲及其效应的重要内容。

由于国内外有关 HEMP 的标准中对波形的定义都是针对自由空间的,为了进行地面附近电子设备的效应研究,需要首先分析 HEMP 在地面附近的环境特性。文献[2]使用菲涅尔反射系数计算了 HEMP 近地面电磁环境参数。该方法是一种解析法,使用时谐表达式在频域中求解各电磁场分量,对于有一定带宽的时域脉冲信号需通过时频转换获得时域结果。虽然解析法能够有效、精确地获得计算结果,但其只能求解若干理想问题,当地面环境变得复杂(如地面附近有效应物存在)时,则需借助数值求解方法完成计算。时域有限差分(FDTD)方法以其强大的建模功能成为一种快速发展的电磁计算方法,然而,当使用 FDTD 的总场-散射场体系处理类似地面之类层状半空间问题时,激励源的引入是个难点。为便于进一步展开地面附近电子设备的效应研究,本文将基于 FDTD 研究垂直入射 HEMP 近地面的电磁脉冲环境。

2 HEMP 的表述形式和特性

目前国内外对 HEMP 的描述中,一般将 HEMP 辐射波形拟合为双指数函数表达式^[3]:

$$E(t) = kE_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \tag{1}$$

式中, $E_0 = 5 \times 10^4$ V/m, k 是修正系数, α 、 β 为表征脉冲前、后沿的参数。目前,描述 HEMP 波形较有影响的有 1976 年出版物标准、Bell 实验室标准和国际电工委员会(IEC)制定的 HEMP 标准等。表 1 列出了 3 种主要电磁脉冲波形标准的表达式参数,其中 t_r 是上升时间, t_p 是衰落时间。

标准	参数				
	k	α	β	t_r/ns	t_p/ns
1976 年出版物	1.04	1.5×10^6	2.6×10^8	7.8	1 465
Bell 实验室	1.05	4.0×10^6	4.76×10^8	4.1	550
IEC	1.3	4×10^7	6×10^8	2.5	55

图 1 显示了 3 种波形标准的时域波形。3 种时域波形的上升时间在 2 ~ 10 ns,持续时间在 0.2 ~ 1 μ s。其中,1976 年出版物波形脉冲最宽,Bell 试验室波形脉宽次之,IEC61000-4-9 波形标准最窄,波形前沿则依次变快。

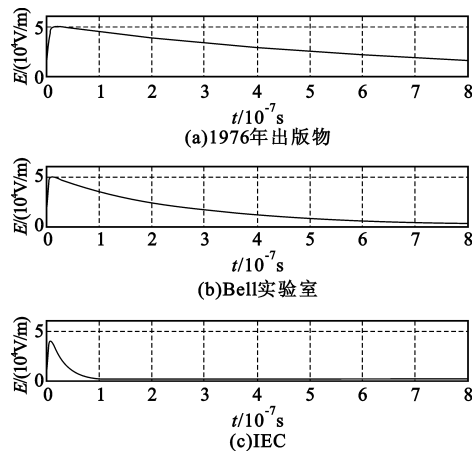


图 1 3 种标准定义的 HEMP 波形
Fig.1 Waveforms of three kinds of HEMP

双指数函数在频域中的表达式为

$$E(\omega) = kE_0(\frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega}) \tag{2}$$

3 种波形标准的归一化频谱如图 2 所示。HEMP 频谱分量从 0 Hz 延伸至约 100 MHz,覆盖了从中频(300 kHz ~ 3 MHz)以下到高频(3 ~ 30 MHz)、甚高频(30 ~ 300 MHz)等多个频段。各种波形的能流分布的主要频段范围(能流比例在 98%)为^[3]: IEC61000-4-9 波形在 100 kHz ~ 100 MHz 之间;Bell 实验室波形在 10 kHz ~ 30 MHz 之间;1976 年出版物波形在约 1 kHz ~ 10 MHz 的频段。可见,HEMP 具有高峰值场强、快上升沿、宽频带等特点,对电子设备构成严重的威胁。

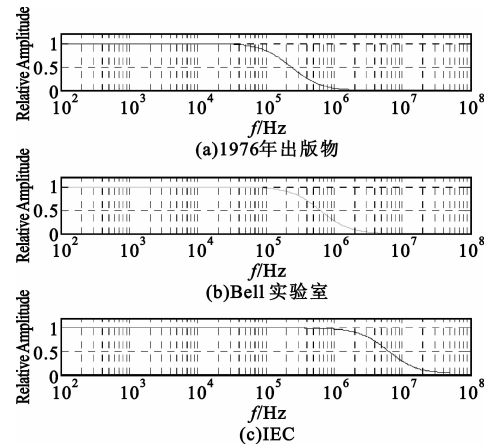


图 2 3 种 HEMP 波形的归一化频谱
Fig.2 Uniform frequency spectrum of three kinds of HEMP

3 一维合成平面波引入方法

FDTD 方法是由微分形式的麦克斯韦旋度方程

出发进行差分离散从而得到一组时域推进公式,在 x 方向的迭代方程是^[4]:

$$E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)=CA(m)\cdot E_x^n\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)+CB(m)\cdot\left[\frac{H_z^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right)-H_z^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k\right)}{\Delta y}-\frac{H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right)-H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z}\right]\tag{3}$$

$$H_x^{n+1/2}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right)=CP(m)\cdot H_x^{n-1/2}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right)-CQ(m)\cdot\left[\frac{E_z^n\left(i,j+1,k+\frac{1}{2}\right)-E_z^n\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta y}-\frac{E_y^n\left(i,j+\frac{1}{2},k+1\right)-E_y^n\left(i,j+\frac{1}{2},k\right)}{\Delta z}\right]\tag{4}$$

式中, $CA(m)=\frac{\frac{\epsilon(m)}{\Delta t}-\frac{\sigma(m)}{2}}{\frac{\epsilon(m)}{\Delta t}+\frac{\sigma(m)}{2}},$

$$CB(m)=\frac{1}{\frac{\epsilon(m)}{\Delta t}+\frac{\sigma(m)}{2}},$$

$$CP(m)=\frac{\frac{\mu(m)}{\Delta t}-\frac{\sigma_m(m)}{2}}{\frac{\mu(m)}{\Delta t}+\frac{\sigma_m(m)}{2}},$$

$$CQ(m)=\frac{1}{\frac{\mu(m)}{\Delta t}+\frac{\sigma_m(m)}{2}},$$

m 的取值与电场或磁场场量的空间位置保持一致。

三波法^[5]中,模型空间定义如图 3 所示。模型空间被分为上下两部分,假设上半空间为自由空间,介质参数为 ϵ_0,μ_0 ;下半空间为某种媒质(如地面),介质参数为 $\epsilon_1,\mu_1,\sigma_1$ 。

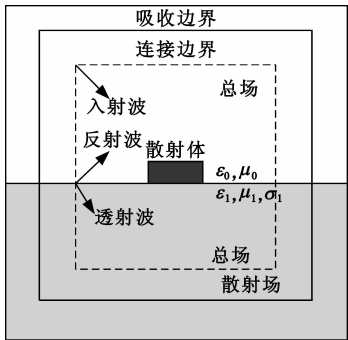


图 3 三波法空间定义

Fig.3 Space definition of three-wave method

由于在 FDTD 计算区域中存在半空间的分界面,模拟半空间状态下的驱动波不能直接使用自由空间中的平面波,这是因为在介质的分界面处会发

生平面波的反射和透射,从而改变了自由空间平面波的传播特性。然而,与自由空间类似,FDTD 中的总场 $\vec{E}_{\text{tot}}, \vec{H}_{\text{tot}}$ 仍然可以分解为驱动波与散射波的叠加,即自由空间部分的组合驱动波为入射波和反射波,总场为入射波、反射波和散射波的叠加:

$$\vec{E}_{\text{tot}}=\vec{E}_{\text{inc}}+\vec{E}_{\text{ref}}+\vec{E}_{\text{scat}}\tag{5}$$

$$\vec{H}_{\text{tot}}=\vec{H}_{\text{inc}}+\vec{H}_{\text{ref}}+\vec{H}_{\text{scat}}\tag{6}$$

下半空间部分的组合驱动波为透射波,总场为透射波和散射波的叠加:

$$\vec{E}_{\text{tot}}=\vec{E}_{\text{tran}}+\vec{E}_{\text{scat}}\tag{7}$$

$$\vec{H}_{\text{tot}}=\vec{H}_{\text{tran}}+\vec{H}_{\text{scat}}\tag{8}$$

式中, $\vec{E}_{\text{inc}}, \vec{H}_{\text{inc}}$ 为入射波, $\vec{E}_{\text{ref}}, \vec{H}_{\text{ref}}$ 为反射波, $\vec{E}_{\text{tran}}, \vec{H}_{\text{tran}}$ 为透射波。

Snell 定律决定了单色波的折射角,但对于具有一定带宽的脉冲波,不同频率对应不同的折射角,使得时域中波的传播变得较为复杂。然而,当 HEMP 作为瞬态脉冲平面波垂直入射地面时,将会使 FDTD 模拟层状半空间的问题变得简单,这是 3 种平面波的均匀特性决定的,如图 4 所示。

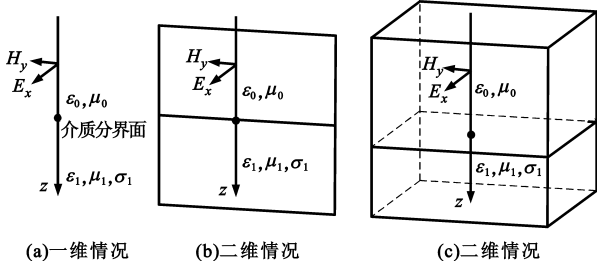


图 4 垂直情况下平面波的均匀特性

Fig.4 Uniform characteristic of plane wave under perpendicular condition

图 4 中,设分层介质为均匀介质,与单色斜入射

时的平面波情况类似,垂直入射的平面波在分界面处的反射波、透射波仍然是平面波,并且,根据 Snell 定律,入射角、反射角和透射角均为 0° ,此时 3 个波的传播方向仅局限在一条直线上。由于组合驱动波假定散射体不存在,仅考虑层状半空间介质,因此在与分层介质分界面平行的平面(即与传播方向垂直的平面)上各点的驱动波保持了相同的变化趋势,此时传播方向(一维)上的电磁场即可模拟这种驱动波的变化关系。

在一维情况下,设横电磁波(TEM)沿 z 轴方向传播,介质参数和场量都与 x 、 y 方向无关,也就是 $\partial/\partial x = 0, \partial/\partial y = 0$,此时的麦克斯韦方程是

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \tag{9}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_m H_y \tag{10}$$

将方程进行 FDTD 离散后,为

$$E_{x,i}^{n+1}(k) = CA(m) \cdot E_{x,i}^n(k) - CB(m) \cdot \frac{1}{\Delta z} \cdot \left[H_{y,i}^{n+1/2}(k + \frac{1}{2}) - H_{y,i}^{n+1/2}(k - \frac{1}{2}) \right] \tag{11}$$

$$H_{y,i}^{n+1/2}(k + \frac{1}{2}) = CP(m) \cdot H_{y,i}^{n-1/2}(k + \frac{1}{2}) - CQ(m) \cdot \frac{1}{\Delta z} \cdot [E_{x,i}^n(k+1) - E_{x,i}^n(k)] \tag{12}$$

可以看到,由麦克斯韦方程直接推导出一维情形 FDTD 迭代方程包含了分层半空间介质中不同的介质属性,其模拟结果恰恰反映了 3 种平面波的合成效果,因此能够避免三波法分解、合成(同步)带来的计算复杂性,直接得到合成平面波。为与在自由空间引入的一维平面波相区分,在这里我们称此处的一维平面波为一维合成平面波。

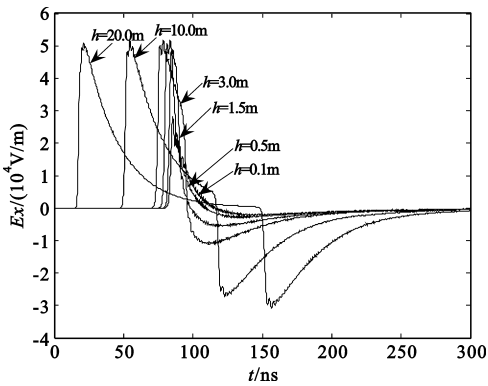
4 垂直入射的 HEMP 在地面附近的电磁脉冲环境

当 HEMP 平面波入射方向垂直地面时,与电场方向平行的电缆将会产生最为严重的感应电流。不失一般性,假设 HEMP 平面波向 $-z$ 方向传播,电场沿 x 方向,由于只有垂直地面方向传播的反射场,且反射电场方向与原电场方向相反,故这种情况下 E_x 的特性即能反映总电场的变化情况。

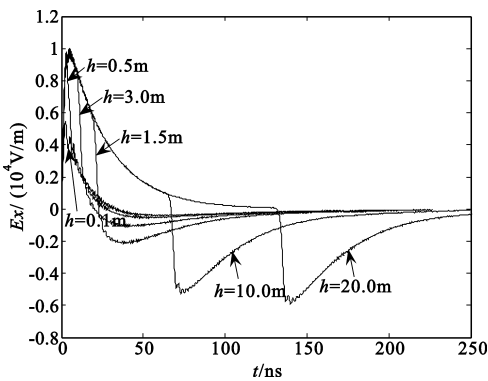
4.1 距地面不同高度位置的电磁脉冲环境

设 HEMP 激励源为 IEC 波形,大地的电气参数为 $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$, $\epsilon_r = 10$, $\mu_r = 1$,HEMP 平面波的传

播方向为 $\theta = 180^\circ, \varphi = -180^\circ$,电场极化角为 $\alpha = 0^\circ$,即 k 沿 $-z$ 方向,电场沿 x 方向(如图 4)。计算距地面不同高度位置(h 为 0.1 m、0.5 m、1.5 m、3.0 m、10.0 m、20.0 m)的 E_x 值,各点的时域波形结果如图 5 所示。



(a)使用全局时间的 E_x 波形



(b)归一化的 E_x 波形

图 5 距地面不同高度位置的 E_x 波形变化情况
Fig.5 Waveforms of E_x at different heights over the ground

从图 5 的结果可以看出,HEMP 垂直入射地面时,在不同位置处电场 E_x 的特点有:

(1)反射场与入射场方向相反,叠加后的总场弱于入射场。在较低的位置(如 $h = 0.1 \text{ m}$ 处),由于边界条件的影响,入射场接触地面后在其峰值尚未到达之前,即出现方向相反的反射波,并且其幅值弱于入射场幅值,因此使得总场峰值降低,结果与文献[2]的描述一致;

(2)随着高度增加(如 h 为 0.5 m、1.5 m、3.0 m 处),正脉冲宽度依次增加,这说明 HEMP 波形在传播的过程中,距地面愈高的点,其入射波的波形受到反射波的影响愈为滞后,从而能够较为完整地保持入射波形。同时,负脉冲幅度随着高度的增加亦在

增加,这说明反射波(负脉冲)在较高的位置占据了主要成分。在 h 为 10.0 m 和 20.0 m 处,基本达到了反射波的峰值,即这两个位置经历了较为完整的入射波(正脉冲)和反射波(负脉冲)的冲击;

(3)反射波在 $h = 20.0$ m 以上的位置继续沿来时方向反向传播。图 6 反映了几个瞬间空间电场波形的变化情况,可以看出反向电场亦达到了万伏/米级的强度。

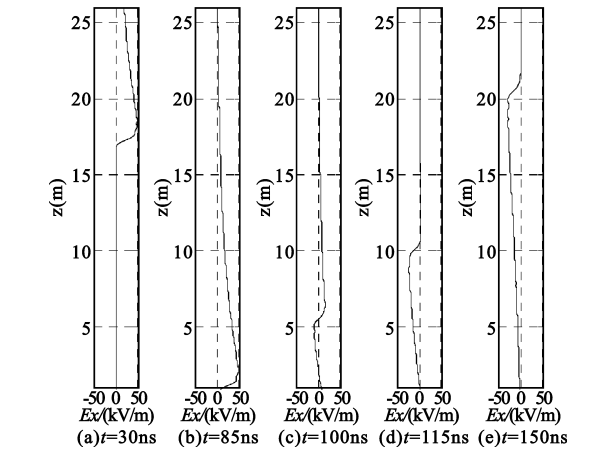


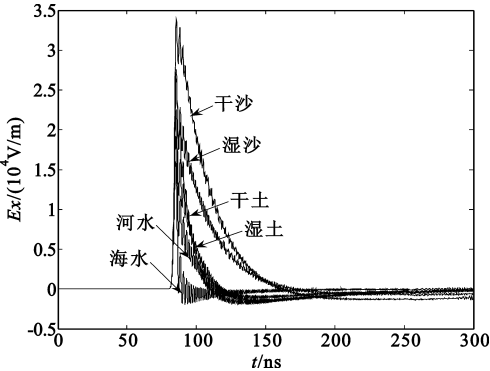
图 6 不同时刻电场 E_x 的空间波形变化情况
Fig. 6 Space waveforms of E_x at different time

4.2 不同地表介质的地面附近电磁脉冲环境

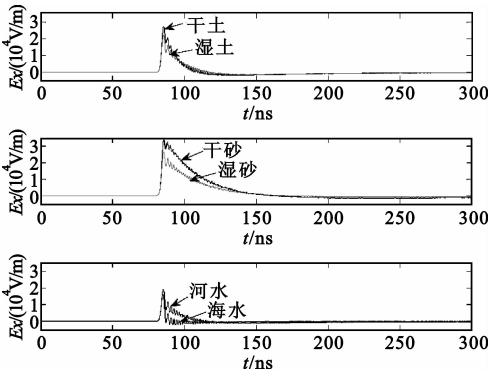
地表介质的电气参数决定了平面波在空气与地表两种界面之间的反射、透射系数,从而影响地面附近电磁脉冲的传播特性。本例仍使用 IEC 波形,且 HEMP 平面波入射方向和电场方向同上例,设不同地表介质的电气参数如表 2 所示^[6-7]。

地表介质	参数	
	电导率 $\sigma/(S/m)$	相对介电常数 ϵ_r
干土	0.02	10
湿土	0.02	30
干沙	0.000 3	5
湿沙	0.000 5	15
河水	0.05	80
海水	3	81

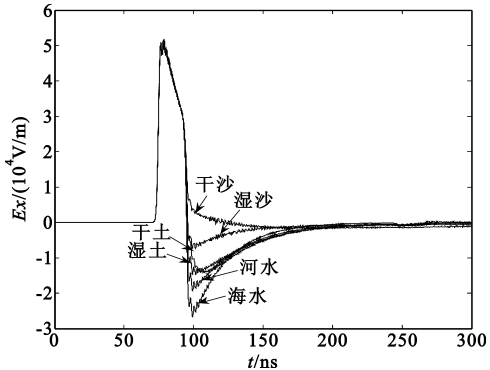
计算在不同地表介质情况下,位于 h 为 0.1 m 和 3.0 m 两点位置处电场 E_x 的变化情况,仿真结果如图 7 所示。



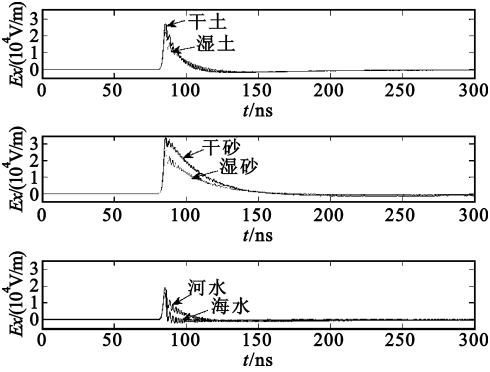
(a) $h = 0.1$ m, 各地表介质附近电磁场环境



(b) $h = 0.1$ m, 类似地表介质附近电磁场环境比较



(c) $h = 3.0$ m, 各地表介质附近电磁场环境



(d) $h = 3.0$ m, 类似地表介质附近电磁场环境比较

图 7 不同地表介质 HEMP 总场 ($h = 0.1$ m、3.0 m) 时域波形
Fig. 7 Waveforms of E_x over different ground medium

从图 7(a)、(c)可以看出,离地面较近的 0.1 m 处所达到的峰值场强比 3.0 m 处小。这是由于在高度 h 较小的地方(如 $h = 0.1$ m 处),入射波还未达到峰值场强时即遭遇到方向相反但幅值小于入射波的反射波,使得总场降低;在高度 h 增加(如 $h = 3.0$ m 处)时,在经历了部分入射波形后,反向的反射波场强开始高于入射波场强,因此反射波在总场中的效果开始明显——出现反向电场。

从图中可以看出,电导率较大的地表介质对总场的影响较大。从图 7(b)可以看出,干砂、湿砂在 $h = 0.1$ m 处峰值场强最大,而河水、海水峰值场强最小;从图 7(d)可以看出,干砂、湿砂在 $h = 3.0$ m 处反向峰值场强最小,而河水、海水则反之。这说明电导率较大的河水、海水所形成的 HEMP 反射波峰值场强较大,从而明显地影响了总场波形。其中,在河水与海水的波形比较中可以发现,电导率最大的海水对 HEMP 总场波形的影响最为明显;而在干土与湿土的比较中可以发现,介电常数对 HEMP 总场波形的影响并不明显。

5 结 论

本文在仿真计算和分析垂直入射地面的 HEMP 平面波在地面附近的电磁脉冲环境参数基础上得到了与自由空间 HEMP 平面波传播特性明显不同的结果。通过对不同高度电磁脉冲场的计算可以看到,在 HEMP 垂直入射地面时,反射场与入射场方向相反,从而削弱了入射场的幅度,该现象在较低的位置处尤其明显,而在较高的位置则会先后经历两次反向的强电磁脉冲;不同的地表介质由于具有不同的电气参数,也会对地面附近电磁脉冲的场特性产生明显影响,其中介质的电导率是重要要素。本文结论为指导地面电子设备的电磁脉冲防护设计提供了有价值的参考,同时也显示出 FDTD 方法在电磁场传播数值计算方面的强大作用。

参考文献:

- [1] 白同云,吕晓德.电磁兼容设计[M].北京:北京邮电大学出版社,2001:8-10.
BAI Tong-yun, LV Xiao-de. EMC design[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2001: 8-10. (in Chinese)
- [2] 谢彦召,孙蓓云,周辉,等.地面附近高空核爆电磁脉冲环境[J].强激光与粒子束,2003,15(7):680-684.
XIE Yan-zhao, SUN Bei-yun, ZHOU Hui, et al. High-altitude electromagnetic pulse environment over the lossy ground[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(7): 680-684. (in Chinese)
- [3] 谢彦召,王赞基,王群书,等.高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J].强激光与粒子束,2003,15(8):781-787.
XIE Yan-zhao, WANG Zan-ji, WANG Qun-shu, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: a review[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787. (in Chinese)
- [4] 葛德彪,闫玉波.电磁波时域有限差分方法[M].2版.西安:西安电子科技大学出版社,2006.
GE De-biao, YAN Yu-bo. The finite difference time domain method of electromagnetic[J]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2006. (in Chinese)
- [5] Wong P B, Tyler G L, Baron J E, et al. A three-wave FDTD approach to surface scattering with applications to remote sensing of geophysical surface[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1996, 44(4): 504-513.
- [6] 王秉中.计算电磁学[M].北京:科学出版社,2005.
WANG Bing-zhong. Computational electromagnetics[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [7] Allen Taflov, Susan C Hagness. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method[M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2000.
- [8] 刘旭东.基于 DDS 的毫米波汽车防撞雷达扫频源设计[J].电讯技术,2010,50(4):61-64.
LIU Xu-dong. DDS-based Sweep Frequency Source Design for Millimeter Wave Automotive Collision Avoidance Radars[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(4): 61-64. (in Chinese)
- [9] 柴焱杰,孙继银,孙东阳,等.双层金属腔体 HEMP 平面波孔缝耦合特性分析[J].电讯技术,2010,50(11):114-118.
CHAI Yan-jie, SUN Ji-yin, SUN Dong-yang, et al. Analysis of the Double Metal Cavities' Aperture Coupling by HEMP Plane Wave[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(11): 114-118. (in Chinese)

作者简介:

柴焱杰(1978-),男,河北邯郸人,第二炮工程学院计算机应用技术专业博士研究生,主要从事电磁场数值计算与电磁脉冲效应研究;

CHAI Yan-jie was born in Handan, Hebei Province, in 1978. He is currently working toward the Ph.D. degree in The Second Artillery Engineering College. His research concerns numerical calculation and EMP effects.

Email: chaiyanjie2005@163.com

孙继银(1952-),男,山东单县人,第二炮工程学院教授、博士生导师,主要从事多媒体信息处理、电磁脉冲效应研究。

SUN Ji-yin was born in Shan County, Shandong Province, in 1952. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor in The Second Artillery Engineering College. His research concerns multimedia disposal and EMP effects.