

地闪雷电电磁脉冲在大地中的分布研究^{*}

杨 波[†] 周璧华 孟 鑫

(解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

(2010 年 1 月 13 日收到; 2010 年 5 月 28 日收到修改稿)

为研究地闪雷电电磁脉冲 (LEMP) 在大地中的分布规律, 采用二维时域有限差分法计算了在雷电通道不同距离处、不同大地电参数条件下 LEMP 在地下不同深度的分布, 并与其他高功率电磁环境在大地中的衰减情况作了对比. 计算结果表明: 随距离增大, 大地中 LEMP 场分量迅速衰减; 大地电导率较大时, 电场分量衰减很大; 大地电容率的变化主要影响 LEMP 的垂直电场分量, 随大地电容率的增大, 垂直电场分量明显减小; 随深度的增大, 电场分量衰减增大, 其高频成分的衰减尤为显著, 低频成分则衰减很小. 由此可知, 对电线电缆实施简单的埋地处理并不能有效防止 LEMP 的耦合效应.

关键词: 雷电电磁脉冲, 大地电导率

PACC: 9260P, 9290

1. 引 言

地闪放电电流产生的电磁脉冲 (LEMP) 效应给电子、电气设备带来的危害越来越受到关注, 关于 LEMP 的研究成果也越来越多. 如杨静等^[1]对雷电在传输线上产生的过电压进行了实验及理论研究, 赵阳等^[2]对人工引雷中闪电电流特征进行了分析, 文献^[3,4]对人工引雷的特点及电场变化进行了测量和讨论. 由于人们活动的区域主要在地面以上, 因而以往对 LEMP 的研究主要集中在地面以上的区域^[5-9], 随着经济、科技的发展, 诸如隧道、地下掩体等设施及埋地电线、电缆不断增多, 地下 LEMP 环境及其防护也越来越多地受到关心, 但目前对 LEMP 在地面以下的分布及其产生的效应研究仍然较少. 系统地研究地下 LEMP 环境是地下设施 LEMP 防护的基础.

计算地面以下 LEMP 时, 需要考虑有限电导率的作用, 精确计算地下 LEMP, 需要引入 Sommerfeld 卷积积分, 这将消耗大量的计算时间, 为此必须对 Sommerfeld 卷积积分进行近似处理. 围绕 Sommerfeld 卷积积分, 产生了各种近似计算方法^[10], 如理想近似法^[11-13], Norton 法^[14]等. 理想近似法将大地视为理想导体, 直接忽略 Sommerfeld 卷

积积分, 虽然该方法能直接进行时域计算、计算效率比较高, 但计算得到的地下场强度为零, 因此该方法不适于计算地面以下 LEMP. Norton 法采用 Norton 衰减函数对 Sommerfeld 卷积积分进行近似处理, 当大地电导率 $\sigma_g \geq 0.001 \text{ S/m}$, 用该方法计算距雷电通道 100—1000 m 范围内的 LEMP 时具有一定精度. 这些近似方法的局限性较大, 应用范围很有限. Cooray^[15]提出的近似方法适用性较强, Delfino 等^[16]提出了高效算法对 Cooray 近似方法的有效性进行了检验, 证明 Cooray 近似方法在大地电导率高于 0.001 S/m 时精度较高, 适用于距雷电通道较远处地下 LEMP 计算. 尽管 Delfino 等提出的高效算法解决了 Sommerfeld 卷积积分, 能够在较短时间内求解出给定场点的值, 但仍无法一次给出所有需要的场点值, 因此在进一步求解耦合问题时该方法的计算效率也不高. 如果要求求解 LEMP 在埋地线缆上的耦合问题, 还需要建立合理的耦合模型. Petrache 等^[17]利用 Cooray 近似方法求解地下 LEMP 场分量, 然后利用传输线耦合模型对 LEMP 在埋地线缆上的耦合进行了理论分析.

时域有限差分 (FDTD) 法在求解电磁场问题上具有广泛的适用性, 同样适合 LEMP 的计算, 杨春山等^[18]提出了采用二维 FDTD 法求解 LEMP 场分布, 并对地面以上 LEMP 场的分布规律进行了研究. 由

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60671007, 60971063) 资助的课题.

[†] E-mail: snihcyb@126.com

于 FDTD 法在整个计算域内求解麦克斯韦方程组, LEMP 的计算不受雷电通道距离的限制, 可以计算距离雷电通道 10 m 以内的场分布, 而离雷电通道越近, LEMP 破坏作用也越大, 因此 FDTD 法是研究雷电通道附近 LEMP 场分布的有力工具. FDTD 法除了可以非常方便地计算 LEMP 外, 还可以不需要任何耦合模型即可对 LEMP 在线缆、屏蔽室等设备上的耦合问题进行计算. 本文采用 FDTD 法对 LEMP 在地下的分布规律进行研究, 为下一步利用 FDTD 法进行地下设施雷电防护的研究提供基础.

2. 计算方法

FDTD 法广泛应用于电磁脉冲方面的研究, 可以通过一次计算就得到计算域中所有场点的值, 计算时不需要进行傅里叶变换和傅里叶逆变换, 直接得到时域波形. 文献[18]提出的二维 FDTD 法可以计算地闪雷电通道附近的 LEMP 场分布, 并对距雷电通道几公里范围内地面以上 LEMP 变化规律进行了研究. 由于 FDTD 法求解 LEMP 场分布时, 直接对麦克斯韦方程组求解, 同样适用于地面以下 LEMP 的计算. 在二维柱坐标系中划分计算域, 将雷电通

道置于 z 轴上, r 轴置于地面上, 如图 1 所示. 由于对称性, 只需计算水平电场分量 E_r 、垂直电场分量 E_z 和水平磁场分量 H_φ . 地面上下的介质电导率 σ 、电容率 ε 分别为 $\sigma = 0, \varepsilon = \varepsilon_0$ 和 $\sigma = \sigma_g, \varepsilon = \varepsilon_{rg}\varepsilon_0$, 其中 ε_{rg} 为大地相对电容率. 在模拟雷电放电通道时采用传输线模型^[19], 计算域的截断采用一阶 Mur 吸收边界.

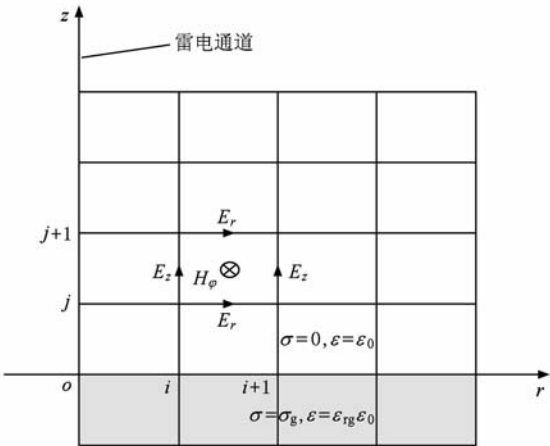


图1 二维柱坐标系中 FDTD 计算域网格划分

E_r, E_z 和 H_φ 的差分公式及雷电通道上源的加入公式分别为

$$\begin{aligned} E_r^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j\right) &= \frac{2 \varepsilon-\sigma \Delta t}{2 \varepsilon+\sigma \Delta t} E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j\right)-\frac{2 \Delta t}{\left(2 \varepsilon+\sigma \Delta t\right) \Delta z}\left[H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)-H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}\right)\right], \\ E_z^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}\right) &= \frac{2 \varepsilon-\sigma \Delta t}{2 \varepsilon+\sigma \Delta t} E_z^n\left(i, j+\frac{1}{2}\right)+\frac{2 \Delta t}{\left(2 \varepsilon+\sigma \Delta t\right) r_i \Delta r}\left[r_{i+\frac{1}{2}} H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)\right. \\ &\quad \left.-r_{i-\frac{1}{2}} H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}\left(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)\right], \\ H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) &= H_\varphi^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)+\frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta r}\left[E_z^n\left(i+1, j+\frac{1}{2}\right)-E_z^n\left(i, j+\frac{1}{2}\right)\right] \\ &\quad -\frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z}\left[E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j+1\right)-E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j\right)\right], \\ E_z^{n+1}\left(0, j+\frac{1}{2}\right) &= \frac{2 \varepsilon-\sigma \Delta t}{2 \varepsilon+\sigma \Delta t} E_z^n\left(0, j+\frac{1}{2}\right)+\frac{8 \Delta t}{\left(2 \varepsilon+\sigma \Delta t\right) \Delta r} H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)-\frac{4 \Delta t}{\pi \varepsilon \Delta r^2} I\left(0, j+\frac{1}{2}\right), \end{aligned}$$

式中时间步长 Δt 的取值应满足 Courant 稳定性条件, Δr 和 Δz 分别表示 r 和 z 方向的空间步长, I 为雷电通道上的电流.

3. 计算结果及讨论

为了研究 LEMP 场在大地中的分布规律, 首先

验证了 FDTD 法计算结果与 Cooray 近似法计算结果的一致性; 然后采用 FDTD 法对不同的大地电参数条件下 LEMP 场分布进行了计算, 分析了影响 LEMP 场分布的因素.

3.1. 方法验证

在将 FDTD 法与 Cooray 近似法进行对比的计算

中,雷电通道基电流峰值 I_0 设为 15 kA,运用双指数脉冲进行模拟,通道基电流表达式为

$$I = 1.1 \times I_0 [\exp(-9.2 \times 10^4 t) - \exp(-0.5 \times 10^7 t)],$$

大地电导率 $\sigma_g = 0.001 \text{ S/m}$,大地相对电容率 $\varepsilon_{rg} = 10$. 对比了距雷电通道 100 m、地面以下 1 和 10 m 处,由 FDTD 法和 Cooray 近似法计算得到的水平电场分量 E_r ,结果如图 2 所示. 由图 2 可以看出,两种完全不同的方法计算结果非常接近,说明了这两种方法在计算大地中 LEMP 的有效性.

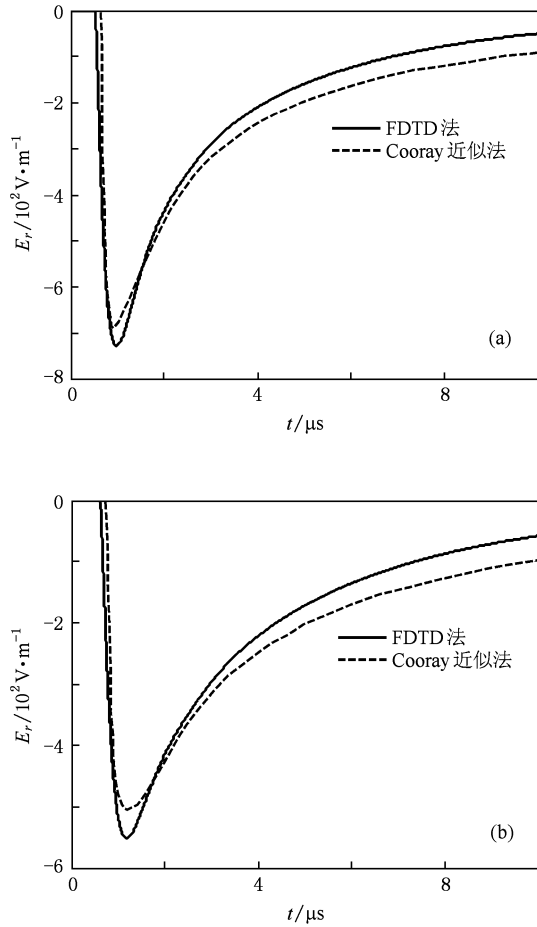


图 2 二维 FDTD 法与 Cooray 近似法的计算结果对比 (a) 地下 1 m 的水平电场, (b) 地下 10 m 的水平电场

3.2. 大地中 LEMP 场的分布规律

由于采用 FDTD 法一次计算就可得到整个计算域中所有场点的值,直接得到 E_r , E_z 和 H_ϕ 三个分量的时域波形,本文采用 FDTD 法进行 LEMP 场在大地中分布规律的研究,计算了距离雷电通道 50, 100, 200 m 处不同大地电导率条件下不同深度处的 LEMP 场分布.

3.2.1. 大地电参数对 LEMP 的影响

影响大地中 LEMP 场分布的大地电参数包括大地电导率 σ_g 和大地电容率 ε_g . 首先计算不同大地电导率 σ_g 对大地中 LEMP 的影响,计算中仍然采用峰值为 15 kA 的通道基电流, σ_g 分别取为 0.0001, 0.0005, 0.001, 0.005, 0.01 S/m, 对距雷电通道 50 m 远、地下 1 m 深处的 LEMP 进行了计算,得到 E_r , E_z 和 H_ϕ 随 σ_g 的变化如图 3 所示. 由图 3 可以看出: 随着 σ_g 的改变, E_r 和 E_z 变化很大, H_ϕ 则变化不大; 随着 σ_g 的增大, 电场分量迅速减小; 当 σ_g 较大时, 大地中电场分量以水平分量为, 垂直分量很小.

大地电容率 ε_g 对 LEMP 影响的计算结果如图 4 所示, 计算中采用的大地相对电容率 ε_{rg} 分别设为 1, 5, 10, 20. 由图 4 可以看出: 不同的 ε_g 对 LEMP 的影响主要体现在垂直电场上, 水平电场变化很小, 水平磁场几乎不受 ε_g 变化的影响. 随着 ε_g 的增大, 垂直电场减小, ε_{rg} 从 1 增大到 20, 垂直电场峰值约减小 25%.

3.2.2. 地面上下水平电场的分布对比

为了研究 LEMP 场分量在大地中的衰减情况, 计算并比较了距雷电通道 50 m 远、地面以下 1 和 10 m 处及地面上 1 和 10 m 处的场分量. 计算结果表明: 地面以下的垂直电场与地面以上的垂直电场相比很小, 可忽略不计; 而磁场分量则受大地影响很小, 地上与地下差别不大. 这里重点比较地面上和地面以下的水平电场分量 E_r , 计算结果如图 5 所示. 由图 5(a) 可以看出, 当大地电导率 σ_g 较低时 (取 $\sigma_g = 0.0001 \text{ S/m}$), 地面以下的 LEMP 场与地面以上的场相比几乎没有衰减, 同时可发现距地面深度为 10 m 的场与深度为 1 m 的场相差不大. 由图 5(b) 可以看出, 当 σ_g 增大时 (取 $\sigma_g = 0.001 \text{ S/m}$), 地上 10 m 处的水平场分量明显增大, 且波形变缓, 低频成分增加, 这与地面反射增强有关, 同时地下水平场分量衰减变大.

3.2.3. 距离 s 对 LEMP 的影响

为了得到大地中 LEMP 随观测点到雷电通道的距离 s 变化的规律, 利用二维 FDTD 法计算并比较了距雷电通道 10, 20, 50, 100, 200 m, 地面下 1 m 深处的场分量 (以水平分量 E_r 为例), 计算结果如图 6 所示. 由图 6 可以看出: 随距离 s 的增大, 地下场分量迅速减小. $s = 100 \text{ m}$ 处的水平电场分量 E_r 仅为 $s = 10 \text{ m}$ 处的 4%. 由此可知, 对于雷电防护, 近区 LEMP 防护尤为重要.

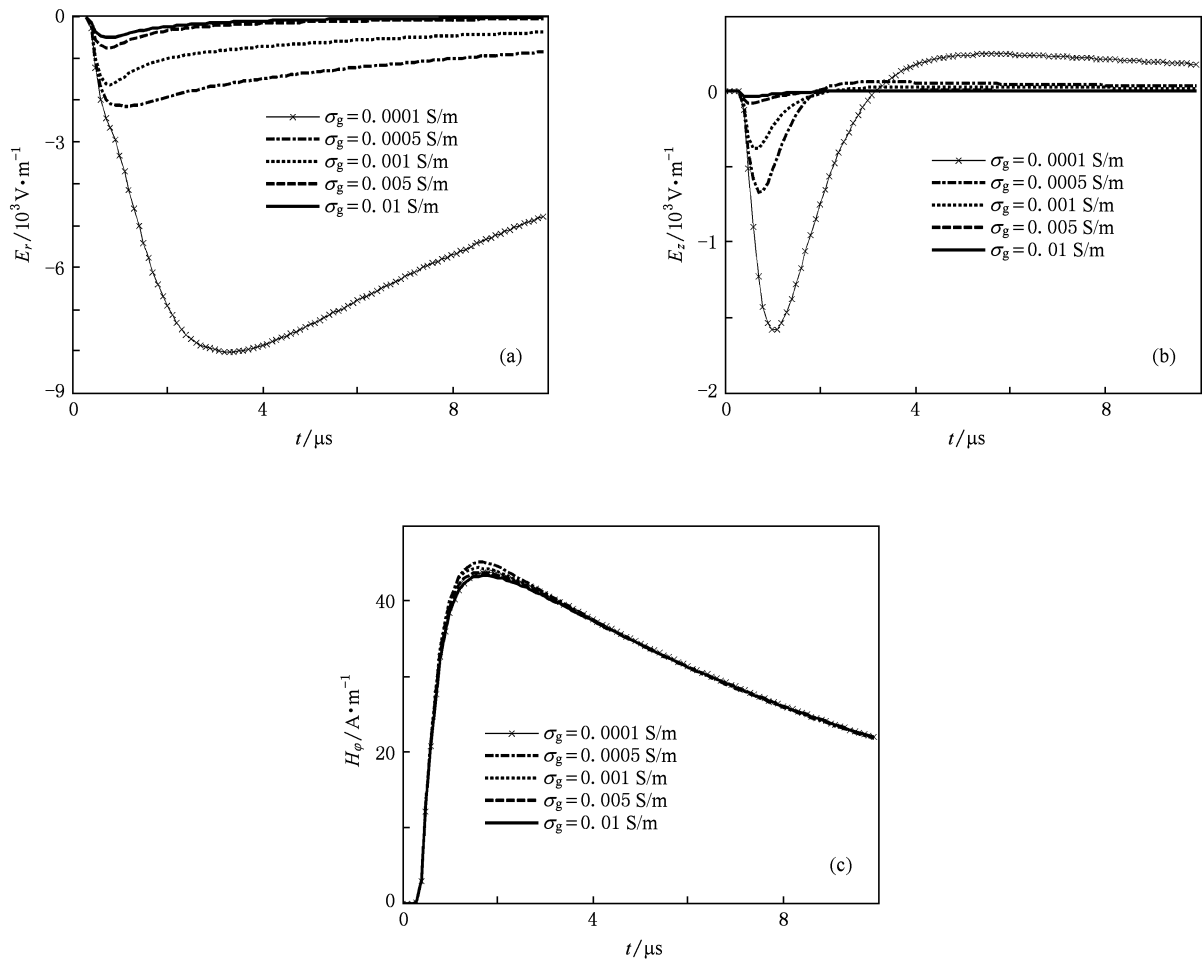


图3 不同大地电导率对地下 LEMP 的影响 (a)水平电场,(b)垂直电场,(c)水平磁场

3. 2. 4. 深度对 LEMP 的影响

LEMP 在大地中传播时,随深度的衰减情况如图 7 所示. 衰减的程度与深度的关系依赖于大地电导率 σ_g 和脉冲的频率. 电磁波向导体中传播时会随深度的增加而迅速衰减,一般高频分量只能存在于导体的一个薄层内,这种现象称为趋肤效应. 电磁波场强振幅衰减到表面处 $1/e$ 的深度,称为趋肤深度. LEMP 在大地中传播时,也只能在大地表层传播. 根据电磁场波动方程可求得在导电媒介中传播时的电场强度瞬时值表达式,以 x 方向分量为例,可表示为

$E(z,t) = e_x E_m \exp(-\alpha z) \cos(\omega t - \beta z + \varphi_0)$,
式中 α 为衰减常数,

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2 - 1 \right]}.$$

LEMP 能量主要集中在频率 2 MHz 以下,对 LEMP

而言,可认为大地是不良导体,其趋肤深度 δ 可采用下式计算:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2}{\mu \varepsilon} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2 - 1 \right]^{-1/2}}.$$

当取 $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 2 \times 10^6 \text{ rad/s}$, $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = 10\varepsilon_0$, σ 分别取 0.01, 0.001, 0.0001 S/m 时,趋肤深度分别为 3.76, 18.17, 168.01 m.

由趋肤深度的概念可知,电场低频分量的趋肤深度大,衰减慢,高频分量的趋肤深度小,衰减快. LEMP 的主要频率分量在 2 MHz 以下,趋肤深度比由以上频率给出的趋肤深度要大,衰减慢,因此可以在图 7(a)中看到,随深度的增大,波形中变化较快的部分(对应高频分量)衰减较大,而波形中变化较缓的部分(对应低频分量)衰减很小. 再从频域看,雷电水平场主要能量集中在低频部分,而随深度增加,低频成分衰减很小,如图 7(b)所示.

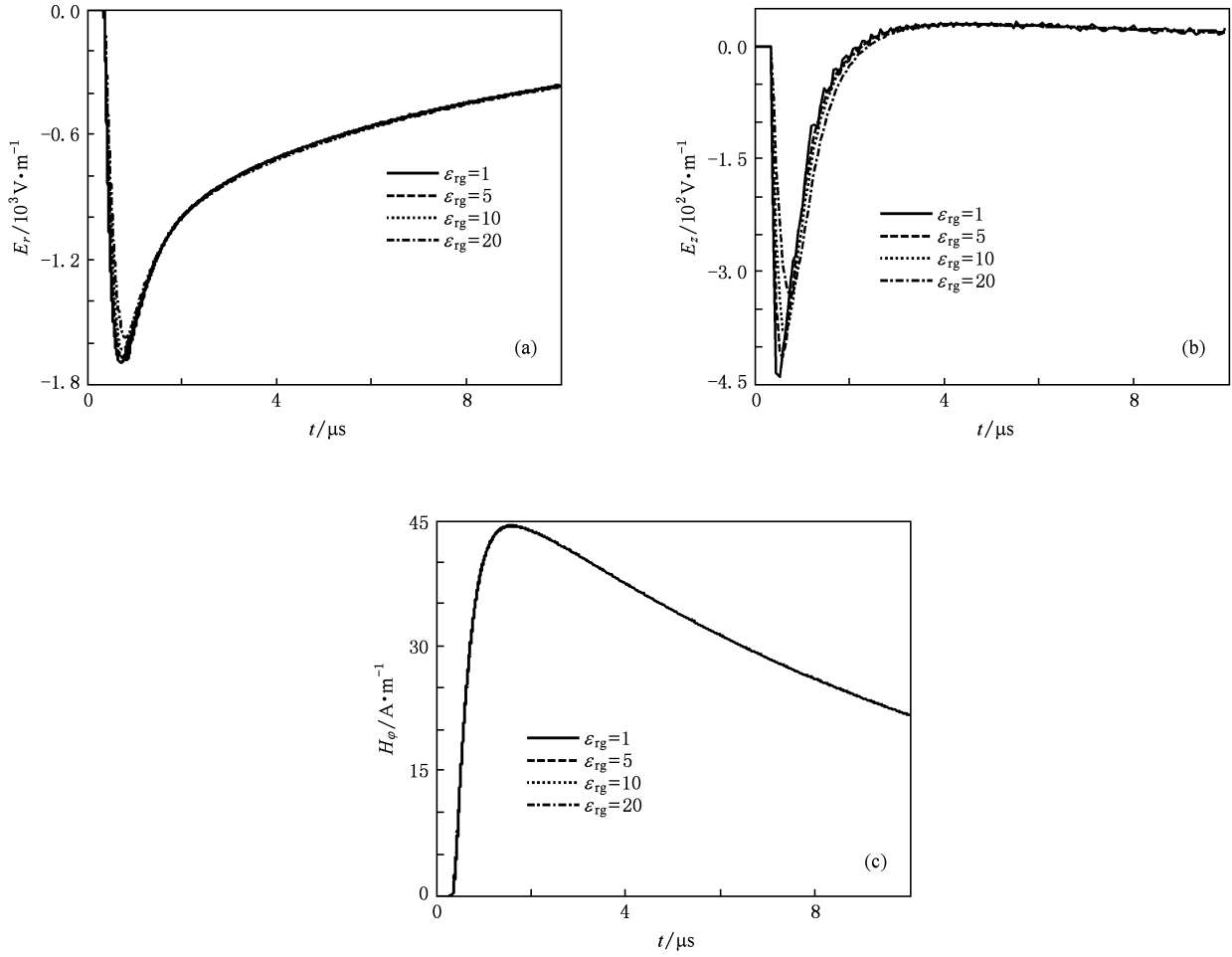


图4 不同大地电容率对地下 LEMP 的影响 (a)水平电场,(b)垂直电场,(c)水平磁场

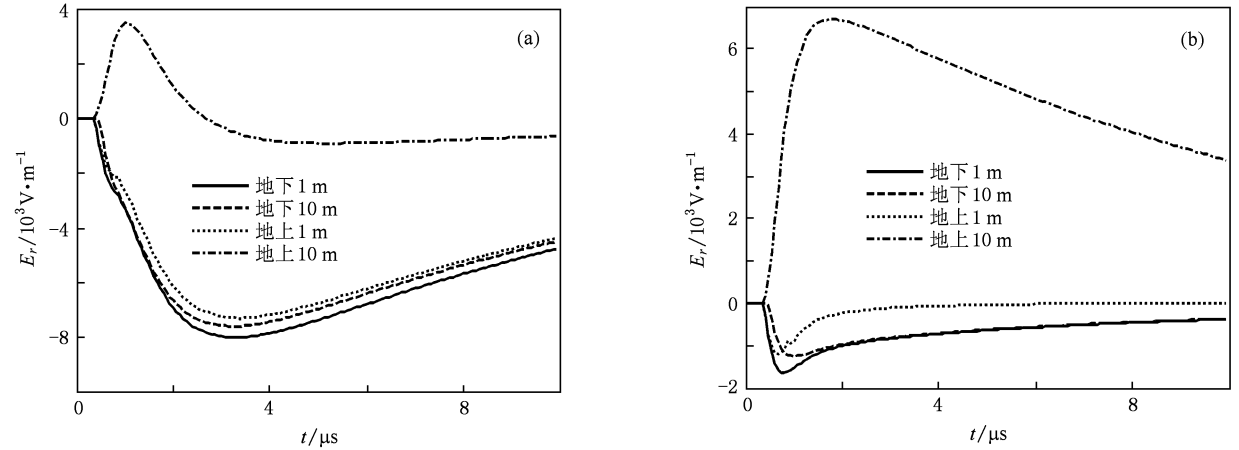


图5 地下水水平电场分量与地上水平电场分量的比较 (a) $\sigma_g=0.0001 \text{ S/m}$, (b) $\sigma_g=0.001 \text{ S/m}$

国际标准 IEC61000-2-13 规定的高功率电磁环境除了 LEMP 外,还包括高空核爆炸电磁脉冲 (HEMP)和超宽带 (UWB)等,LEMP 能量主要集中在低频段,且其功率谱密度高于其他高功率电磁环境的功率谱密度.这里我们将 HEMP 和 UWB 在地

下的衰减情况与 LEMP 做一比较. HEMP 的表达式为

$$E = kE_0[\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)],$$

式中 $k = 1.3$, $\alpha = 4.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 6.0 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$; UWB 采用上升前沿为 0.3 ns , 脉冲半高宽为 0.3 ns

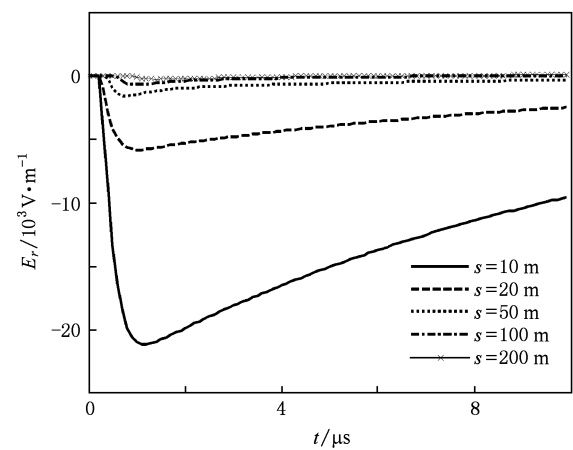
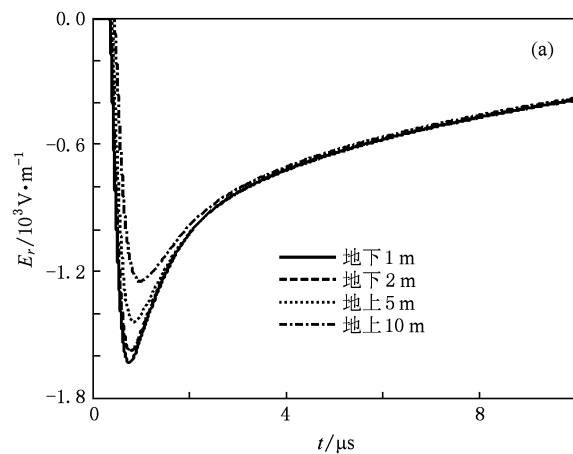


图6 距离对地下水平电场的影响



的单个高斯脉冲模拟，其表达式为

$$E = E_0 \exp[-(t - t_0)^2 / T^2],$$

式中 $t_0 = 2.8 \times 10^{-10}$ s, $T = 2.5 \times 10^{-10}$ s, $E_0 = 50$ kV/m.

设 HEMP 和 UWB 均从地面上方向地面垂直入射,两者的水平电场分量 E_h 在地下的衰减情况分别如图 8、图 9 所示. 由于 HEMP 和 UWB 所覆盖的频段很高,故两者随深度的衰减较快,在距地面 10 m 深处,峰值及整个波形的幅度分别衰减为入射场的 40% 和 13% 左右. 从频域上看,在其覆盖频段内都呈现明显的衰减.

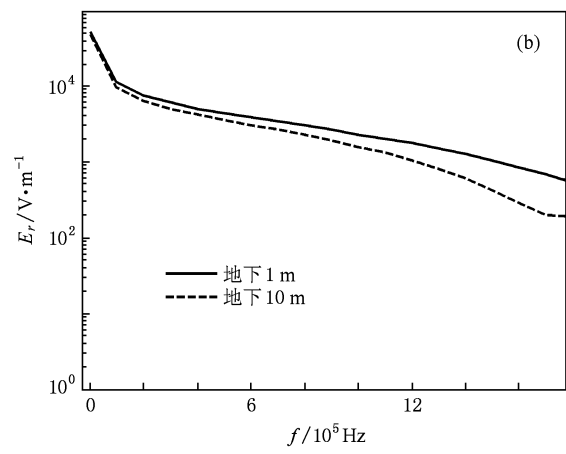


图7 深度对 LEMP 水平电场的影响 (a) 时域波形, (b) 频域分析

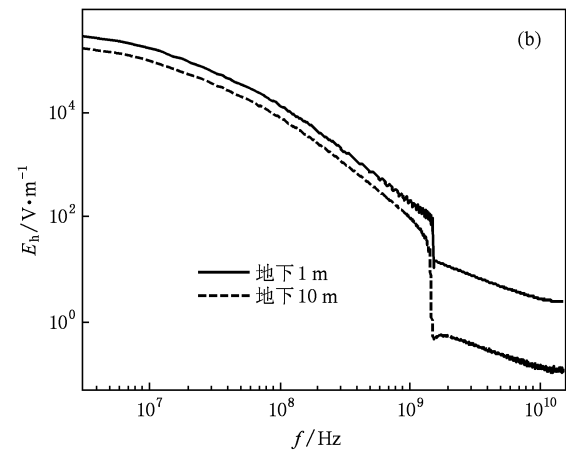
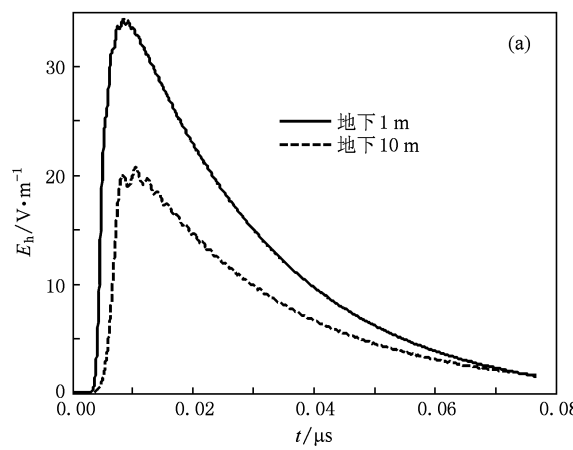


图8 深度对 HEMP 的衰减 (a) 时域波形, (b) 频域分析

从以上比较可知,LEMP 在大地中的衰减要比 HEMP 和 UWB 小得多. 试图依赖于大地对 LEMP 的衰减,对需要 LEMP 防护的设施做简单的埋地处理获得理想的防护效果是不可行的.

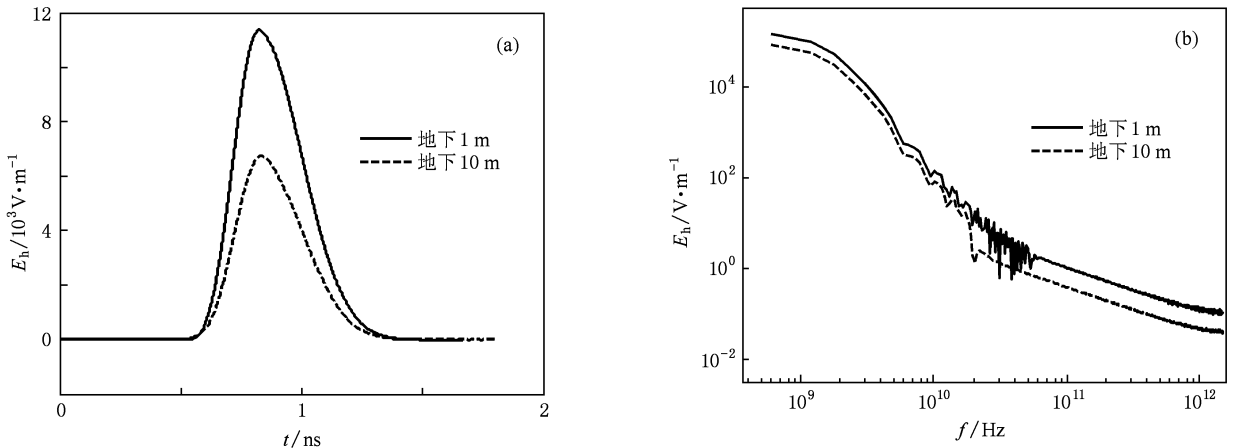


图9 深度对UWB的衰减 (a) 时域波形, (b) 频域分析

4. 结 论

LEMP 在大地中的衰减受大地电导率的影响很大,在同一深度处,随大地电导率的增大,电场分量的衰减迅速增加,磁场分量则变化不大. 当大地电导率较高时,大地中电场分量以水平分量为主;垂直电场很小,在 LEMP 效应研究中可忽略不计. 大地

电容率的变化主要影响 LEMP 垂直电场分量的大小,大地电容率增大,垂直电场随之减小. 随距离增大,大地中 LEMP 迅速衰减,距雷电通道 100 m 以内的 LEMP 防护尤为重要. 随深度的增大,水平电场分量减小,且大地电导率越高,衰减越快,高频成分衰减较为明显,大量的低频成分则衰减缓慢. 由此可知,仅对电线、电缆之类的长导体进行简单的埋地处理并不能有效防止 LEMP 的毁伤或干扰效应.

[1] Yang J, Qie X S, Wang J G, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [杨 静、郗秀书、王建国、赵 阳、张其林、袁铁、周筠珩、冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]

[2] Zhao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese) [赵 阳、郗秀书、孔祥贞、张广庶、张 彤、杨 静、冯桂力、张其林、王东方 2009 物理学报 **58** 6616]

[3] Qie X S, Zhao Y, Zhang Q L, Yang J, Feng G L, Kong X Z, Zhou Y J, Zhang T L, Zhang G S, Zhang T, Wang D F, Cui H H, Zhao Z K, Wu S J 2009 *Atmos. Res.* **91** 310

[4] Zhang Q L, Qie X S, Wang Z H, Zhang T L, Yang J 2009 *Radio Sci.* **44** 127

[5] Master M J, Uman M A 1984 *IEEE Trans. Power App. Syst.* **103** 2502

[6] Cooray V 1992 *Radio Sci.* **27** 529

[7] Rakov V A 2001 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **43** 654

[8] Pokharel R K, Ishii M, Baba Y 2003 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **45** 651

[9] Baba Y, Rakov V A 2006 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **48** 212

[10] Ren H M 2007 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: University of Science and Technology of Chinese People's Liberation Army) (in Chinese) [任合明 2007 博士学位论文(南京:解放军理工大学)]

[11] Sommerfeld A 1909 *Ann. Phys.* **28** 665

[12] Uman M A 1985 *J. Geophys. Res.* **90** 6121

[13] Wu T, King R W P 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 4345

[14] Norton K A 1937 *Proc. IEEE* **25** 1203

[15] Cooray V 2001 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **43** 75

[16] Delfino F, Procopio R, Rossi M, Rachidi F, Nucci C A 2007 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **49** 401

[17] Petrache E, Rachidi F, Paolone M, Nucci C A, Rakov V A, Uman M A 2005 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **47** 498

[18] Yang C S, Zhou B H 2004 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **46** 133

[19] Rakov V A, Uman M A 1998 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **40** 403

Distribution of cloud-to-ground lightning electromagnetic pulse fields under the ground^{*}

Yang Bo[†] Zhou Bi-Hua Meng Xin

(*Engineering Institute of Corps of Engineers, University of Science and Technology of
Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210007, China*)

(Received 13 January 2010; revised manuscript received 28 May 2010)

Abstract

In order to find out the distribution of lightning electromagnetic pulse (LEMP) fields under the ground, the two-dimensional finite-difference time-domain method is used to calculate LEMP under the ground. The distributions of LEMP under the ground are calculated in the cases of different distances from the lightning channel, different ground conductivities, different ground permittivities and different depths. The attenuations of lightning fields in the ground are compared with those of other high-power electromagnetic environments. The calculated results show the following points: the LEMP dramatically attenuates as the distance increases; the attenuation of the electric component is significant when the ground conductivity is reasonably high; the change of ground permittivity mainly causes the change of vertical electric field component, which decreases as the ground permittivity increases; the attenuation of the high frequency electric component increases and that of the low frequency electric component invisibly changes as the depth increases.

Keywords: lightning electromagnetic pulse, ground conductivity

PACC: 9260P, 9290

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60671007, 60971063).

[†] E-mail: snihcyb@126.com