

引用格式:胡佩,慕晓冬,易昭湘,等.不均匀媒质近地面 HEMP 电磁环境特性研究[J].电光与控制,2019,26(1):81-86. HU P, MU X D, YI Z X, et al. Near-surface electromagnetic field of HEMP based on inhomogeneous media[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(1):81-86.

不均匀媒质近地面 HEMP 电磁环境特性研究

胡佩, 慕晓冬, 易昭湘, 王殿海
(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: 确定 HEMP 近地面电磁环境是研究近地面电子设备的 HEMP 效应的基础。由于地面对电磁场具有反射作用,使得近地面的电磁环境与自由空间的电磁脉冲环境相差较大。通过分析近地面 HEMP 传播特性以及土壤电气参数的不同,建立不均匀媒质影响模型,采用修正的菲涅尔反射系数对模型进行理论计算,验证 CST 数值仿真方法的准确性及简便性,并对近地面复杂电磁场环境进行仿真计算。结果表明:不同波形、距地高度、上层厚度以及入射角度对 HEMP 影响较为明显,不均匀媒质使得近地面 HEMP 电磁脉冲环境异于均匀媒质,此结果能为指导近地面电磁脉冲防护提供基本依据。

关键词: 地面电磁环境; 电子设备; HEMP; 不均匀媒质; 数值仿真

中图分类号: TJ91 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.01.018

Near-Surface Electromagnetic Field of HEMP Based on Inhomogeneous Media

HU Pei, MU Xiao-dong, YI Zhao-xiang, WANG Dian-hai
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Determining the near-surface electromagnetic environment of HEMP is the basis for studying the HEMP effect of near-surface electronic devices. Since the ground has a reflection effect on the electromagnetic field, the electromagnetic environment near the ground is quite different from the electromagnetic pulse environment in free space. By analyzing the propagation characteristics of near-surface HEMP and the difference of soil electrical parameters, an inhomogeneous media influence model was established. The modified Fresnel reflection coefficient was used to calculate the model, the accuracy and simplicity of CST numerical simulation method were validated, and a simulation was made to the near-surface complex electromagnetic environment. The results show that: 1) The waveform, ground height, upper layer thickness and incident angle have obvious influence on HEMP; and 2) Inhomogeneous medium makes the near-surface HEMP electromagnetic pulse environment different from that of the homogeneous medium. The conclusion supplies a basic basis for guiding the near-surface electromagnetic pulse protection.

Key words: surface electromagnetic environment; electronic device; HEMP; inhomogeneous medium; numerical simulation

0 引言

随着战争形态由机械化向信息化的逐步推进,信息化装备在战场上的作用愈发明显且具有不可替代和替代的地位^[1]。然而,复杂的电磁环境对电子设备产生的影响也是不可忽视的,尤其是自然雷电或者人为

产生的强电磁脉冲,一旦耦合到信息系统内部,瞬间产生的巨大能量会使电子设备受到工作干扰或者功能损伤^[2],从而影响整个系统的稳定性,甚至会造成作战失败。当前,国内外对高空核爆电磁脉冲(High-altitude Electromagnetic Pulse, HEMP)的标准只限于自由空间的 HEMP 特性,对近地面电子设备的影响效应大都针对均匀土壤进行研究。文献[3]分析了双层土壤中各层电导率对波形的影响;文献[4]建立了双层土壤模型,简单地分析了地面附近的电磁环境,对其他方面并未做更深一步的研究。另外,虽然对近地面电磁环境

收稿日期:2017-12-17 修回日期:2018-12-13

基金项目:装备预研基金项目(6140A24010202)

作者简介:胡佩(1994—),男,湖南双峰人,硕士生,研究方向为智能信息处理及计算机仿真。

能够进行数值计算得到规律性的认识,但是也仅限于较为简单的情形,对于相对复杂以及不规则的情形就难以解决。为了解决更为复杂条件下的电磁环境,本文使用菲涅尔反射系数计算了 HEMP 近地面电磁环境参数,与 CST 仿真软件进行对比验证,证明了 CST 数值仿真的正确性,并基于此研究了不同条件所引起的电磁环境变化规律。

1 近地面 HEMP 的传播特性

高空核爆电磁脉冲(HEMP)是在高空发生核爆炸时与大气分子之间相互作用产生的电磁脉冲。图1所示为 HEMP 斜入射模型和以一定极化角度入射模型。

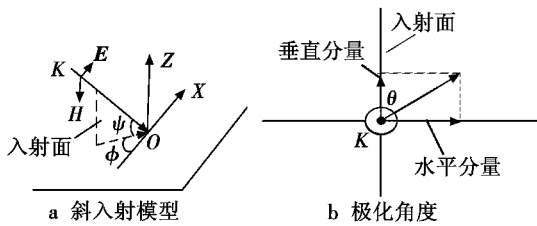


图1 斜入射模型和极化角度图

Fig.1 Oblique incidence model and polarization perspective

图1中: K 表示 HEMP 入射方向; E 为 HEMP 电场; H 为 HEMP 磁场; ϕ 为方位角; ψ 为入射俯仰角; θ 为电场矢量 E 与入射面的夹角(极化角)。当 HEMP 辐射大地时,在高空某一点的电场强度是入射波和反射波叠加的结果。与单层土壤不同,HEMP 在双层土壤中要经过多次的反射和叠加,在高空某处的强度是入射波与双层反射的多次叠加的结果。图2所示为入射波在双层土壤处的反射和透射。

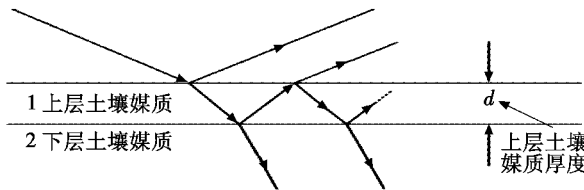


图2 双层反射示意图

Fig.2 Double reflection schematic

目前,对于 HEMP 的表示方式有很多,多以双指数函数作为波形的数学表达式^[5],即

$$E(t) = E_0 p (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

式中: E_0 为峰值场强; p 为修正参数; α, β 分别为脉冲前、后沿参数; t 为脉冲持续时间。由傅里叶变换得到其频域表达式^[5]为

$$E(\omega) = p E_0 \frac{\beta - \alpha}{(\alpha - j\omega)(\beta + j\omega)} \quad (2)$$

任意极化角度入射的高空核爆电磁脉冲可以用电场强度表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^i = \mathbf{E}_v^i + \mathbf{E}_h^i = E_0 [\cos \theta (x \sin \psi \cos \phi - y \sin \psi \sin \phi + \\ z \cos \psi) + \sin \theta (x \sin \phi + y \cos \phi)] \cdot \\ e^{-ikx \cos \psi \cos \phi} e^{iky \cos \psi \sin \phi} e^{-ikz \sin \psi} \end{aligned} \quad (3)$$

将任意极化角度分解为垂直极化和水平极化。式中: E_v^i 表示垂直极化分量; E_h^i 表示水平极化分量; k 表示传播常数, $k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, ϵ_0 和 μ_0 分别表示自由空间中的介电常数和磁导率。考虑到大地反射,在计算中引入了菲涅耳反射系数,垂直极化和水平极化的菲涅耳公式^[4]分别为

$$R_v = \frac{\epsilon_g (1 + \frac{\sigma_g}{i\omega \epsilon_g \epsilon_0}) \sin \psi - \sqrt{\epsilon_g (1 + \frac{\sigma_g}{i\omega \epsilon_g \epsilon_0}) - \cos^2 \psi}}{\epsilon_g (1 + \frac{\sigma_g}{i\omega \epsilon_g \epsilon_0}) \sin \psi + \sqrt{\epsilon_g (1 + \frac{\sigma_g}{i\omega \epsilon_g \epsilon_0}) - \cos^2 \psi}} \quad (4)$$

$$R_h = \frac{\sin \psi - \sqrt{\epsilon_g (1 + \frac{\sigma_g}{i\omega \epsilon_g \epsilon_0}) - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\epsilon_g (1 + \frac{\sigma_g}{i\omega \epsilon_g \epsilon_0}) - \cos^2 \psi}} \quad (5)$$

式中, ϵ_g, σ_g 表示的是大地的相对介电常数和电导率。根据上式可得垂直极化反射波表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_v^{\text{ref}} = E_0 \cos \theta R_v (-x \sin \psi \cos \phi + y \sin \psi \sin \phi + \\ z \cos \psi) e^{-ikx \cos \psi \cos \phi} e^{iky \cos \psi \sin \phi} e^{-ikz \sin \psi} \end{aligned} \quad (6)$$

水平极化反射波表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_h^{\text{ref}} = E_0 \sin \theta R_h (x \sin \phi + y \cos \phi) \cdot \\ e^{-ikx \cos \psi \cos \phi} e^{iky \cos \psi \sin \phi} e^{-ikz \sin \psi} \end{aligned} \quad (7)$$

在距离地面高度 h 处,沿 x 轴方向的水平电场 $E_x(x, 0, h)$ 是入射电场与反射场的叠加,其算式为

$$\begin{aligned} E_x(x, 0, h) = E_0 [\cos \theta \sin \psi \cos \phi (e^{ikh \sin \psi} - \\ R_v e^{-ikh \sin \psi}) + \sin \theta \sin \phi (e^{ikh \sin \psi} + \\ R_h e^{-ikh \sin \psi})] e^{-ikx \cos \psi \cos \phi} \end{aligned} \quad (8)$$

在考虑土壤模型时,在大多数情况下认为土壤为单层模型是不准确的,各个岩层的土壤电气参数均是不同的,因此,反射系数的修正表达式^[6]为

$$R = \frac{R_{12} + R_{23} e^{-\delta}}{1 + R_{12} R_{23} e^{-\delta}} \quad (9)$$

垂直极化和水平极化都可以用这个表达式。式中: R_{12} 为空气与第1层土壤的反射系数; R_{23} 为第1层与第2层之间的反射系数; δ 为

$$\delta = 2d \frac{\omega}{c} (p + iq) \quad (10)$$

d 为第1层土壤的厚度, p, q 分别为^[4]

$$p = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\epsilon_{r2} - \sin^2 \psi + \sqrt{(\epsilon_{r2} - \sin^2 \psi)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\epsilon_0 \omega} \right)^2} \right]} \quad (11)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} \left[-(\epsilon_{r2} - \sin^2 \psi) + \sqrt{(\epsilon_{r2} - \sin^2 \psi)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\epsilon_0 \omega} \right)^2} \right]} \quad (12)$$

垂直极化反射波表达式为

$$E_v^{ref} = E_0 \cos \theta R'_v (-x \sin \psi \cos \phi + y \sin \psi \sin \phi + z \cos \psi) e^{-ik_x \cos \psi \cos \phi} e^{iky \cos \psi \sin \phi} e^{-ik_z \sin \psi} \quad (13)$$

水平极化反射波表达式为

$$E_h^{ref} = E_0 \sin \theta R'_h (x \sin \phi + y \cos \phi) \cdot e^{-ik_x \cos \psi \cos \phi} e^{iky \cos \psi \sin \phi} e^{-ik_z \sin \psi} \quad (14)$$

式中, R'_v, R'_h 分别为修正后的垂直极化波和水平极化波的反射系数。

在距离地面高度 h 处, 沿 x 轴方向的水平电场 $E_x(x, 0, h)$ 是入射电场与反射场的叠加, 其算式为

$$E_x(x, 0, h) = E_0 [\cos \theta \sin \psi \cos \phi (e^{ikh \sin \psi} - R'_v e^{-ikh \sin \psi}) + \sin \theta \sin \phi (e^{ikh \sin \psi} + R'_h e^{-ikh \sin \psi})] e^{-ik_x \cos \psi \cos \phi} \quad (15)$$

上式均为频域表达式, 要得到时域波形, 需先将高空核爆电磁脉冲的双指数表达式傅里叶变换, 代入上式, 再进行傅里叶逆变换就可以得到叠加的时域波形。

为了验证 CST 仿真的准确性, 分别以单层和双层模型为例。单层模型设置为: 土壤为干土, 土壤的相对介电常数 $\epsilon_{r1} = 7$, 电导率 $\sigma_1 = 0.002 \text{ S/m}$, $\mu_{r1} = 1$ 。双层模型设置为: 上层为干土, 厚度为 1 m, 土壤的相对介电常数 $\epsilon_{r1} = 7$, 电导率 $\sigma_1 = 0.002 \text{ S/m}$, $\mu_{r1} = 1$; 下层为湿土, 土壤的相对介电常数 $\epsilon_{r2} = 15$, 电导率 $\sigma_2 = 0.01 \text{ S/m}$, $\mu_{r2} = 1$ 。两种模型均选择俯仰角 $\psi = 90^\circ$, 方位角 $\phi = 0^\circ$ 、极化角 $\theta = 90^\circ$ 及电场方向沿 x 轴, 磁场方向沿 y 轴, 把理论计算与仿真结论进行对比, 结果如图 3 所示。

以上两种求解近地面的 HEMP 波形的的方法均能得到比较准确的结果, 但是两种方法性能不同。理论方法

表 1 3 种常用的 HEMP 参数

Table 1 Three commonly-used HEMP parameters

类型	α	β	ρ	t_r/ns	t_f/ns	τ/ns	t/ns
1976 年国内出版物标准	1.5×10^6	2.6×10^8	1.04	7.8	1465	483	1559
Bell 实验室标准	4.0×10^6	4.7×10^8	1.05	4.1	550	184.4	588
IEC 标准	4.0×10^7	6.0×10^8	1.30	2.5	55	23	64

建立双层土壤模型: 上层为干土, 厚度为 1 m, 土壤相对介电常数 $\epsilon_{r1} = 7$, 电导率 $\sigma_1 = 0.002 \text{ S/m}$, $\mu_{r1} = 1$; 下层为湿土, 土壤的相对介电常数 $\epsilon_{r2} = 15$, 电导率 $\sigma_2 = 0.01 \text{ S/m}$, $\mu_{r2} = 1$, 俯仰角 $\psi = 90^\circ$ 、方位角 $\phi = 0^\circ$ 、极化角 $\theta = 90^\circ$, 及电场方向沿 x 轴, 磁场方向沿 y 轴。采用不同波形照射, 分别测得距离地面 0.1 m, 1 m, 3 m, 5 m, 20 m, 50 m 处的电场强度, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知: 3 种 HEMP 电磁脉冲波形在近地面的电磁环境是有较大差别的。相对 IEC 标准波形, Bell 实验室标准波形和 1976 年国内出版物标准波形峰值衰减较慢, 半脉冲宽较大, 持续时间长。但是 IEC 标准波形的负向脉冲较其他两种波形差别较为明显, 其负

求解精度较高, 但是当地表媒质趋于复杂时, 计算就会变得非常困难, 而 CST 仿真则可直接进行建模, 方便准确, 在复杂条件下更具有优势, 在本文中得到充分体现。

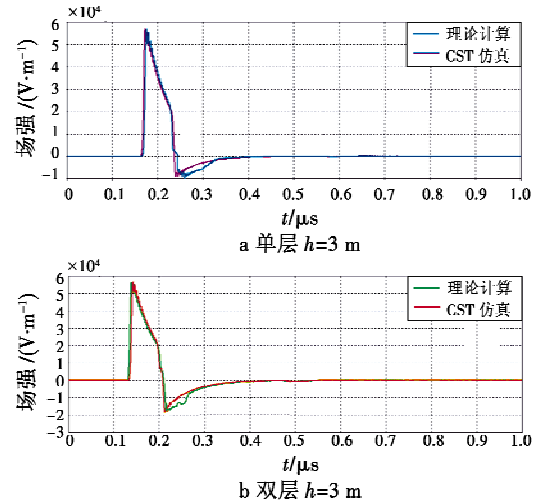


图 3 理论计算与仿真对比图

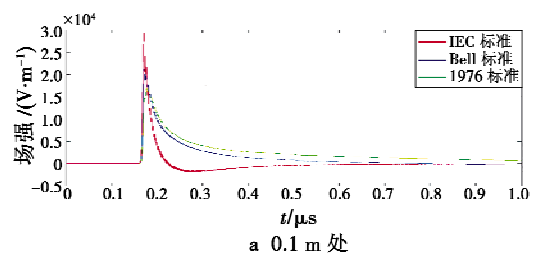
Fig. 3 Comparison of theoretical calculations with simulations

2 地表不同条件对 HEMP 环境影响研究

2.1 不同波形的影响研究

目前使用比较广泛且公认的 HEMP 电磁脉冲类型有 3 种^[5], 分别是 1976 年国内出版物标准、Bell 实验室标准和 IEC 标准, 其数值表现如表 1 所示, 其中: ρ 为修正参数, α, β 分别为脉冲前、后沿参数; t_r 为脉冲上升时间; t_f 为脉冲下降时间; τ 为半峰宽; t 为脉冲持续时间。

向脉冲出现位置较低, 峰值较大, 且较为尖锐。实际上, 大部分电子设备基本上都处在 5 m 以内的高度, 在这个范围内, 3 种波形的响应相差相对较小, 但是由于其峰值非常大, 故重点要对正向脉冲进行防护, 防止器件被瞬间击穿。



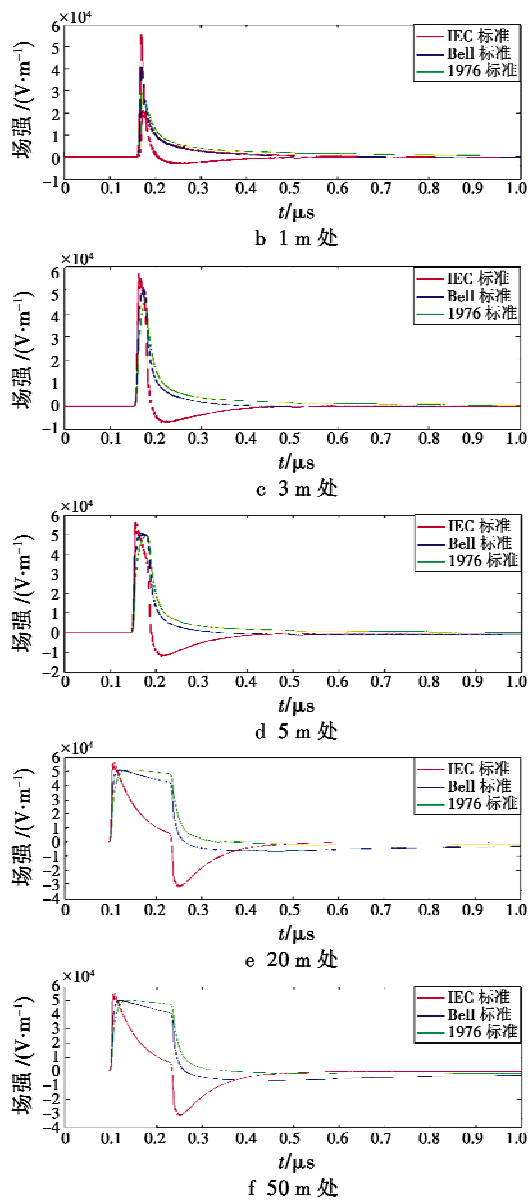


图4 不同波形仿真实验图

Fig. 4 Different waveform simulation

2.2 距地高度的影响研究

不同种类电子系统的主要设备在空间中有不同的分布,HEMP条件下,在距离地面不同高度处,接收到的反射波的时间、幅值也不相同。因此,研究不均匀地面附近不同高度处的电磁环境,可以给不同的电子系统提供防护依据。建立双层模型:上层为干土,厚度为1 m,土壤相对介电常数 $\varepsilon_{r1} = 7$,电导率 $\sigma_1 = 0.002 \text{ S/m}$, $\mu_{r1} = 1$;下层为湿土,土壤相对介电常数 $\varepsilon_{r2} = 15$,电导率 $\sigma_2 = 0.01 \text{ S/m}$, $\mu_{r2} = 1$,俯仰角 $\psi = 90^\circ$,方位角 $\phi = 0^\circ$,极化角 $\theta = 90^\circ$,及电场方向沿 x 轴,磁场方向沿 y 轴,采用 IEC 标准波形,分别测得距离地面 0.1 m, 1 m, 3 m, 10 m, 20 m, 50 m 处的电场强度,仿真结果如图 5 所示。

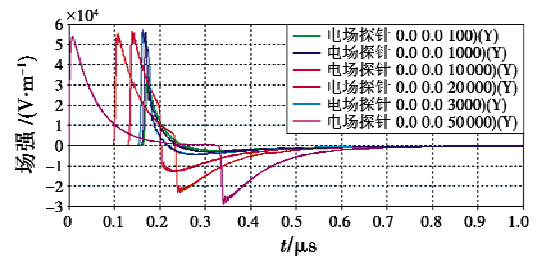


图5 不同高度处时域波形图

Fig. 5 Time-domain waveform at different heights

分析图 5 结果可知:在 0.1 m, 1 m, 3 m, 10 m, 20 m, 50 m 处都会出现负向脉冲,可以得出反射波与入射波的电场方向相反,且波形负向脉冲宽度随着高度的增加依次增加,幅值也依次增加;在高度为 0.1 m 处,正向脉冲峰值明显比其他高度要小,其场强峰值只有 32 kV/m,出现这种现象的原因是:在 0.1 m 处,位置较低,在入射波的电场强度没有到达峰值时,地面反射的反射波就已经达到了 0.1 m 处,与入射波相叠加,导致总场强下降。

为了进一步确定达到最高场强的高度,基于以上条件,分别在 0.1 ~ 2 m 与 10 ~ 60 m 之间等距设置探针,得到在不同高度的电场峰值,如图 6 所示。

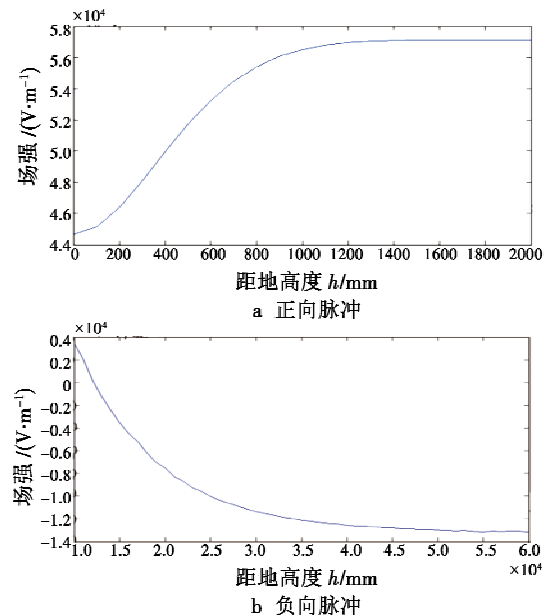


图6 不同高度电场峰值

Fig. 6 Electric field peaks at different heights

对比不同的高度可以得出,随着高度的增加,正向脉冲幅值依次增加,到达 HEMP 峰值后不再增加,这个高度大概在 1.2 m;当高度超过 50 m 后,负向幅值几乎达到了峰值,然后按照负向双指数函数的形式继续传播。因此,假设 HEMP 垂直入射,当电子系统在一定高度时,会经历完整的两次脉冲,分别是峰值较大的正

向脉冲和幅值较小的负向脉冲;当电子系统处于较低位置时,会经历一次较小的正向脉冲和幅值非常小的负向脉冲。

2.3 上层厚度影响研究

保持媒质的双层结构不变,上层设置为干土,下层设置为湿土。上层土壤厚度分别取为 1 m,2 m,4 m,6 m;土壤的相对介电常数 $\epsilon_{r1} = 7$,电导率 $\sigma_1 = 0.002 \text{ S/m}$, $\mu_{r1} = 1$,下层土壤的相对介电常数 $\epsilon_{r2} = 15$,电导率 $\sigma_2 = 0.01 \text{ S/m}$, $\mu_{r2} = 1$,俯仰角 $\psi = 90^\circ$,方位角 $\phi = 0^\circ$ 、极化角 $\theta = 90^\circ$,电场方向沿 x 轴,磁场方向沿 y 轴,采用垂直入射、水平极化的 IEC 标准波形的激励源进行仿真研究,在距离媒质 3 m 处进行测量,得到如图 7 所示波形。

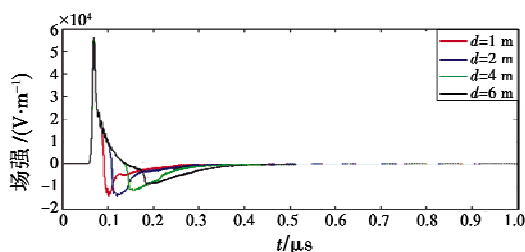


图 7 不同上层厚度仿真时域波形图

Fig.7 Simulated time-domain waveform

图 7 中,由左到右上层媒质厚度依次为 1 m,2 m,4 m,6 m,在高度为 3 m 处都可以到达 HEMP 的正向峰值。对于负向的脉冲,随着土壤厚度的增加,会出现时间延迟,且负向峰值也依次减小,这是因为随着上层土壤厚度的逐渐增加,反射的电磁波在土壤中传播的时间延长,损耗增加。

2.4 入射角度影响研究

发生高空核爆时,入射波可以从任意角度入射,考虑到土壤的水平分层结构,本文从双层媒质两个方面研究不同角度入射时,近地面水平和垂直两个方向的电磁环境。

2.4.1 垂直极化条件下不同入射角度仿真研究

土壤采用双层结构:上层为干土,厚度为 1 m,土壤相对介电常数 $\epsilon_{r1} = 7$,电导率 $\sigma_1 = 0.002 \text{ S/m}$, $\mu_{r1} = 1$,下层为湿土,土壤相对介电常数 $\epsilon_{r2} = 15$, $\mu_{r2} = 1$,方位角 $\phi = 0^\circ$,且极化角 $\theta = 90^\circ$,电场方向沿 x 轴,磁场方向沿 y 轴,采用垂直极化 IEC 标准波形,改变入射角度,在距离地面高度为 0.5 m 处进行测量,由垂直极化可知,电场有水平和垂直两个方向的分量,而磁场只有水平方向的分量,如图 8 所示。

由图 8a 可知,水平场分量的峰值和脉冲宽度随着入射角的增大而减小,且最大峰值小于 HEMP 的峰值,

在一定入射角度时会出现负值,这说明水平方向的反射波是在抵消入射波。

由图 8b 可知,垂直分量的峰值和脉冲宽度随着入射角度的增大而增大,到一定角度时峰值会大于 HEMP 峰值,没有出现负值,说明垂直方向上的反射波是与入射波同向。

由图 8c 可知,总场的峰值和脉冲宽度随着入射角度增大而增大,且峰值都大于 HEMP 的峰值,说明斜入射时会使电子系统承受更大的电场强度。

3 个时域波形图都会出现多个峰值,这是由于在干土和湿土的分界面也会出现反射造成的。

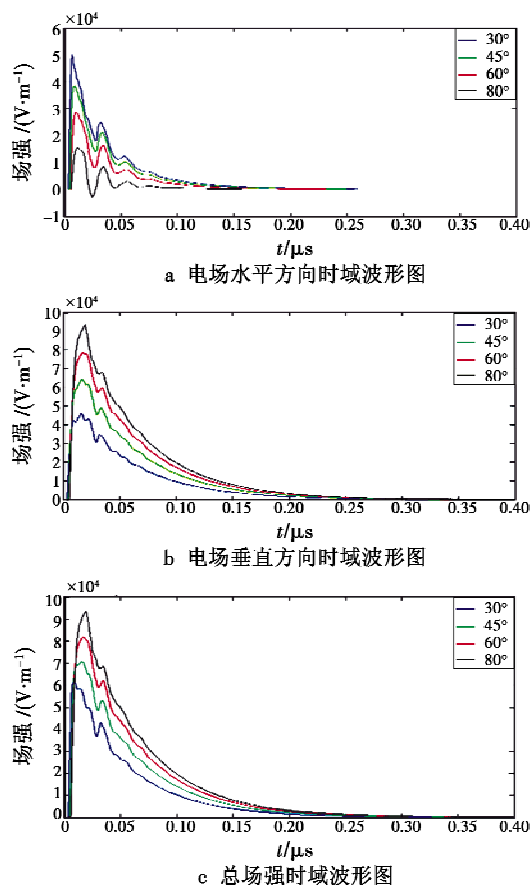


图 8 垂直极化条件下不同入射角度仿真图

Fig.8 Simulation diagram of vertical polarization at different angles of incidence

2.4.2 水平极化条件下不同入射角度仿真研究

设置与上文相同,仅改变入射角度,本文采用水平极化,电场只有水平方向的分量,波形如图 9 所示。

由图 9 可知,采用水平极化时,入射波和反射波会出现两个峰值,第一个峰值随着入射角度的增加而减小,第二个峰值保持不变。总体上分析可知,最大峰值都小于 HEMP 的峰值,说明水平极化时,反射波削弱入射波,叠加的总场比 HEMP 的峰值小。

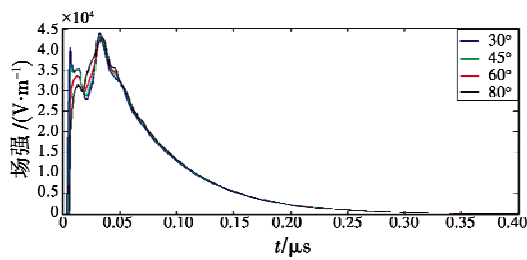


图9 水平极化条件下改变入射角度仿真图

Fig.9 Change of incident angle under horizontal polarization conditions

3 结论

本文通过理论计算与仿真的方法相结合,验证了复杂条件下建模仿真的可信性,对不均匀地面土壤的近地面 HEMP 反射波的波形特征及近地面电磁环境进行研究的结果如下所述。

1) 不同 HEMP 激励波形对近地面的 HEMP 电磁环境会产生不同的影响,但在 5 m 以内的波形相差不大,进行防护时需重点对正向脉冲进行防护。

2) 不同高度位置电场峰值不一样,较低位置由于反射波与入射波相互叠加使得电场峰值会小于 HEMP 峰值,大概在 1.2 m 处正向脉冲会达到 HEMP 峰值,也就是说,在大于等于 1.2 m 位置,会经历两次完整的正向脉冲和反向脉冲。由于土壤的反射作用,双层土壤无论是正向脉冲还是负向脉冲,都较单层的脉冲宽度窄。

3) 随着上层土壤厚度的增加,HEMP 在土壤的传播时间延长,损耗增加,使得负向脉冲的峰值出现时间在延迟且减小。

4) 无论是垂直极化波还是水平极化波,不均匀土壤均比均匀土壤复杂,在各个方向上的电场乃至总场,在不同入射角的作用下均会出现双峰或者多峰,这与单层土壤具有极大的差异。

参考文献

- [1] 徐伯夏,丁国辉,黄靖.复杂电磁环境下 C⁴ISR 系统的防护研究[J].电光与控制,2011,18(3):1-4.
- [2] 乔登江.高功率电磁脉冲、强电磁效应、电磁兼容、电磁易损性及评估概论[J].现代应用物理,2013,4(3):219-224.
- [3] 文刚,姜勤波,齐世举,等.水平分层电导率对 HEMP 近地面电磁环境的影响[J].第二炮兵工程大学学报:自然科学版,2015,29(2):1-5.
- [4] 孙蓓云,周辉.两层损耗土壤媒质附近 HEMP 环境[J].核电子学与探测技术,2013,33(5):572-575.
- [5] 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.
- [6] CURTIS J O. A computational tool for simulating plane wave reflectance from layered lossy media [R]. ADA431408, 2005.
- [7] 王兵学,雍杨,霍义华,等.基于纹理特征分析的海天线检测算法[J].红外技术,2013,35(1):42-46.
- [8] 艾锐,史泽林,张程硕.低信噪比红外图像直线段检测算法[J].红外与激光工程,2013,42(1):278-284.
- [9] 傅叶涛,杜昌平,赵耀.基于主方向的直线检测算法[J].计算机应用,2015,35(2):220-222,249.
- [10] VON GIOI R G, JAKUBOWICZ J R M, MOREL J M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 32(4):722-732.
- [11] BURNS J B, HANSON A R, RISEMAN E M. Extracting straight lines[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(4):425-455.
- [12] 刘松涛,周晓东,王成刚.复杂海空背景下鲁棒的海天线检测算法研究[J].光电工程,2006,33(8):5-10.
- [13] 王林.基于非局部均值的图像去噪方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [14] 王丁禾,牛照东,汤达,等.多级分割融合算法提取红外舰船目标潜在区[J].激光与红外,2013,43(4):461-465.
- [15] 陈青华,谢晓方,肖楚琬,等.基于海天/海岸线检测的舰船目标提取方法[J].红外,2011,32(6):39-43.
- [16] 张锋,杨树谦,倪汉昌.舰船红外图象特征提取及目标识别技术探讨[J].红外与激光工程,1991,20(2):21-25.
- [17] PRINCEN J, ILLINCWORTH J, KITTLER J. A formal definition of the Hough transform: properties and relationships [J]. Journal of Mathematical Imaging & Vision, 1992, 1(2):153-168.
- [18] 张森,于文博,沈飞,等.基于改进 Hough 算法的高光谱数据直线检测方法研究[J].上海航天,2017,34(3):27-32.

(上接第46页)

参考文献