

文章编号: 1672-2892(2012)05-0559-04

## 核电磁脉冲地波传播规律

孙蓓云, 程引会, 聂鑫, 周辉

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 介绍了核电磁脉冲地波传播的理论计算方法, 研究了当大地电导率大于 0.005 S/m 时, 地波传播函数随频率及传播距离的变化规律, 并计算了不同传播距离核爆电磁脉冲的地波电场。结果表明, 频率越高, 传播距离越远, 传播函数的幅值越小; 核爆电磁脉冲的传播距离为 500 km 时, 电场的幅度会有大于一个量级的衰减。

**关键词:** 核爆电磁脉冲; 电导率; 电波传播; 地波

**中图分类号:** TN99; O441

**文献标识码:** A

## Propagation of the nuclear electromagnetic pulse ground wave

SUN Bei-yun, CHENG Yin-hui, NIE Xin, ZHOU Hui

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

**Abstract:** The principle of the ground wave propagation for Electromagnetic Pulse(EMP) is presented. The propagation function of ground wave varying with the distance and frequency is developed as the ground conductivity above 0.005 S/m, and the EMP ground wave of nuclear explosion at different distances are computed. The results show that the amplitude of the propagation function is reduced with the increasing of frequency and distance, and the EMP ground wave is attenuated by ten times at a distance of 500 km from nuclear explosion location.

**Key words:** nuclear electromagnetic pulse; conductivity; radio propagation; ground wave

核爆炸产生的电磁脉冲, 频段主要在超低频和极低频波段, 可在地—电离层所构成的波导中进行传播。利用核爆产生的电磁脉冲作为核探测的一种手段早在二十世纪五、六十年代就有人提出, 国内外都开展了相关的电磁脉冲传播规律的研究<sup>[1-4]</sup>, 取得许多电波传播规律的研究成果, 代表人物有 James R Wait<sup>[5]</sup>和 J R Johler 等。国内在电波传播方面也有相关的论著<sup>[6]</sup>, 随着数值技术的发展, 也可采用时域方法计算 VLF(Very Low Frequency)频段的电波传播规律<sup>[7-8]</sup>, 但时域方法较频域方法所耗计算时间要长。在当前全面核禁试的新形势下, 由于这种核监测的方法具有响应快、定位准确等特点, 又开始受到重视, 而开展核电磁脉冲传播规律的研究则是这种核监测方法的理论基础。在核电磁脉冲传播规律的研究中, 通常用几十公里处近距离观测到的地波电场波形去推测上千公里远距离的电场波形, 有效的方法是利用傅里叶变换将脉冲时域信号变成频域信号, 然后乘以传播函数, 最后通过逆傅里叶变换得到所需的时域信号。在几何波跳理论中, 地面某处的电场是地波与天波的合成, 因此, 地波传播规律研究是电波传播研究的重要组成部分; 另外, 许多远程通信都采用地波传播方式, 地波传播规律的研究在当今仍有重要意义。传播距离和大地的电导率是影响地波传播的 2 个重要参数, 本文主要采用频域方法研究大地电导率大于 0.005 S/m 时核爆电磁脉冲的地波传播规律。

### 1 地波传播的计算公式

地波传播的计算公式有多种, 一般情况下采用 Wait 给出的频域计算公式<sup>[5]</sup>。如果地球某处有垂直的电流源  $I(\omega)$ , 距源点距离为  $d$  的电场为:

$$E_0(\omega, d) = \frac{i\omega\mu_0 I(\omega)l}{2\pi d} \left( \frac{\theta}{\sin \theta} \right)^2 \exp(-ikd)W(\omega, d) \quad (1)$$

式中： $\mu_0$ 为自由空间的导磁率； $l$ 是电偶极子的长度； $k$ 是自由空间的传播常数； $I(\omega)$ 是电流源的频谱； $W(\omega, d)$ 是传播函数； $\theta$ 为观测点与源点之间的地心角。通过逆傅里叶变换就可得到时域波形。

$$\mathbf{E}_0(t, d) = \frac{\mu_0 l}{2\pi d} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} i\omega I(\omega) W(\omega, d) \exp(i\omega(t-d/c)) d\omega \quad (2)$$

式中  $c$  为光速。传播函数可由级数给出：

$$W(\omega, d) = (\pi x)^{\frac{1}{2}} \exp(-i\frac{\pi}{4}) \sum_s \frac{\exp(-ixt_s)}{t_s - q^2} \frac{w_1(t_s - y_1)}{w_1(t_s)} \frac{w_1(t_s - y_2)}{w_1(t_s)} \quad (3)$$

式中： $y_1 = \left(\frac{2}{ka}\right)^{\frac{1}{3}} kh_1$ ， $a$  为地球的半径， $h_1$  为接收高度； $y_2 = \left(\frac{2}{ka}\right)^{\frac{1}{3}} kh_2$ ， $h_2$  为发射高度； $x = \left(\frac{d}{a}\right) \left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}}$ ； $q = -i \left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \Delta_g$ ； $\Delta_g = \left(\frac{i\epsilon_0 \omega}{\sigma_g + i\epsilon_g \omega}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{i\epsilon_0 \omega}{\sigma_g + i\epsilon_g \omega}\right)^{\frac{1}{2}}$ ， $\epsilon_0$  是空气中的介电常数， $\sigma_g$  与  $\epsilon_g$  分别是大地的电导率及介电常数； $w_1$  为 Airy 积分函数， $t_s$  是式(4)的根。

$$w_1'(t) - qw_1(t) = 0 \quad (4)$$

为了便于计算，将接收点和发射点置于地球表面，传播函数变成：

$$W(\omega, d) = (\pi x)^{\frac{1}{2}} \exp(-i\frac{\pi}{4}) \sum_s \frac{\exp(-ixt_s)}{t_s - q^2} \quad (5)$$

如果大地电导率  $\sigma > 0.005$  S/m，可将大地视为高电导率的导体，这样  $q=0$ ，式(4)变为  $w_1'(t)=0$ ，与频率无关，该等式的根为：

$$t_s = \exp(-i\frac{\pi}{3}) \left(\frac{3\pi v_s}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

式中  $v_s \approx s + \frac{1}{4} - \frac{0.00795}{s+1/4}$ ， $s=0,1,2,\dots$ 。

图 1 给出了距源点 200 km, 500 km, 1 000 km, 2 000 km 和 3 000 km 传播函数随频率的变化关系。从图中可以看出，距离越远，频率越高，传播函数的幅值越小。

由距爆心  $d_1$  距离的电场推知  $d_2$  距离的电场时， $d_2$  距离的电场满足下列关系：

$$\mathbf{E}_0(t, d_2) = \frac{d_1}{d_2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_0^{\infty} \mathbf{E}_0(t', d_1) \exp(-i\omega t') dt' \right) \left( \frac{W(\omega, d_2)}{W(\omega, d_1)} \right) \exp(i\omega t) d\omega \quad (7)$$

如果  $d_1$  距源点的距离较近，通常只有几十公里，则  $W(\omega, d_1) \approx 1$ 。

## 2 不同传播距离核电磁脉冲地波波形

44.6 km 处地面附近核电磁脉冲的理论计算归一化波形与频谱如图 2 所示，时域波形的持续时间约为 150  $\mu$ s，频谱为指数波频谱迭加一个主频约为 18.7 kHz 振荡波频谱。

图 3 给出 200 km, 500 km, 1 000 km, 1 500 km 核电磁脉冲地波波形，图中扣除了时间延迟，图 4 给出了电场幅度随距离的变化关系。从图中可知，当传播距离大于 500 km 后，电场的幅度会有大于一个量级的衰减。

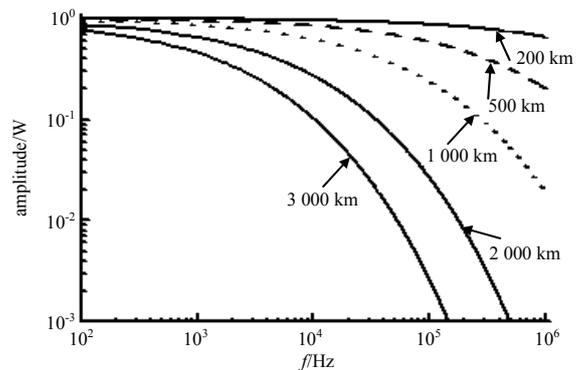


Fig.1 Propagation function of different distances  
图1 不同距离的传播函数

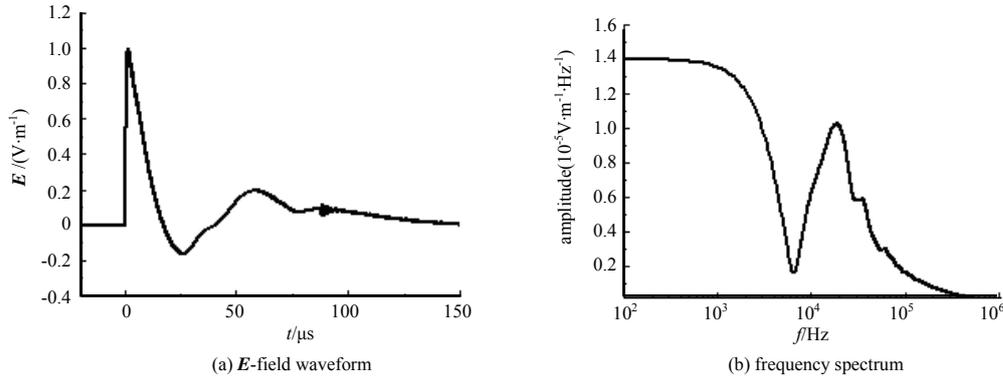


Fig.2 E-field waveform and frequency spectrum of nuclear explosion at 44.6 km  
图 2 近距离理论计算的核爆电场波形与频谱

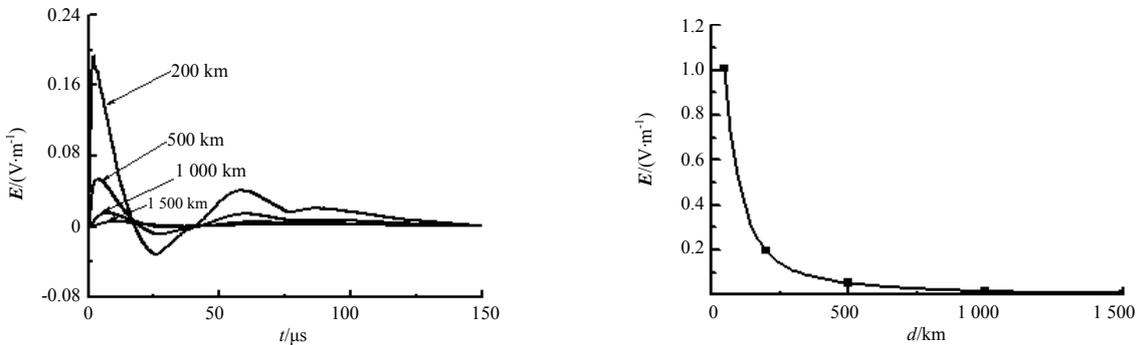


Fig.3 EMP ground wave of nuclear explosion at different distances  
图 3 不同传播距离的核爆电磁脉冲地波波形

Fig.4 E-field amplitude of EMP ground wave vs. propagation distances  
图 4 地波电场幅度随传播距离的变化关系

3 结论

本文利用 Wait 地波传播计算公式,计算了大地电导率大于 0.005 S/m 时地面附近核爆电磁脉冲不同传播距离的电场波形,结果表明,随着传播距离的增加,高频分量衰减增加,电场的幅度迅速降低。本文的研究结果对核电磁脉冲探测技术研究具有一定的参考价值。

参考文献:

[ 1 ] Wait J R. Propagation of electromagnetic pulse in terrestrial waveguide[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1965,13(6):904-918.

[ 2 ] Johler J R,Morgenstern J C. Propagation of ground wave electromagnetic signal, with particular reference to a pulse of nuclear origin[J]. Proceeding of IEEE, 1965,53(12):2043-2053.

[ 3 ] Solifrey W. Exact Solution for the Propagation of Electromagnetic Pulses over a Highly Conducting Spherical Earth[M]. Santa Monia,Calif.:Rand Corp., 1968.

[ 4 ] 王东文. 中近距离电磁脉冲传播分析-核爆远区探测[M]. 北京:解放军出版社, 1985. (WANG Dongwen. Electromagnetic pulse propagation to intermediate and long distance-Nuclear explosion detection at long distance[M]. Beijing:The People's Liberation Army Press, 1985.)

[ 5 ] Wait J R. Electromagnetic waves in stratified media[M]. University of Michigan:Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996.

[ 6 ] 潘威炎. 长波超长波极长波传播[M]. 成都:电子科技大学出版社, 2004. (PAN Weiyan. LF VLF ELF Wave Propagation[M]. Chengdu:Electronic Science and Technology University Press, 2004.

[ 7 ] Berenger J P. FDTD computation of VLF-LF propagation in the Earth-ionosphere waveguide[J]. Annals Telecommunications, 2002,57(11-12):1059-1090.

[ 8 ] Berenger J P. Long-range propagation of lightning pulses using the FDTD method[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2005,47(4):1008-1011.

(下转第 578 页)