

核电磁脉冲的频谱分析和空间场分布研究

王世鑫

兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年3月14日; 录用日期: 2023年5月16日; 发布日期: 2023年5月23日

摘要

为了研究核电磁脉冲的空间频谱和电场分布规律,以1976年学术出版社制定的双指数函数波形模拟核电磁脉冲,对核电磁脉冲波形的时域参数、频谱、能流谱进行分析,分析得出核电磁脉冲的频谱范围在100 MHz,在0.001~10 MHz能流占比为96%,在100 MHz能流占比为99.8%。并根据频谱分析结果在多物理仿真软件COMSOL中建立模型,进行空间电场分布仿真计算。得出结论:在100 MHz的频率下,电场的空间分布呈中间大四周小分布,随着核电磁脉冲传播距离的逐渐增加,电场强度值逐渐减小,同一平面中间电场值的衰减速度要快于四周的电场值衰减速度,其空间的电场分布越来越趋于均匀分布。在相同距离下,随着核电磁脉冲频率的增加,其电场分布值逐渐减小,且越趋向于均匀分布。

关键词

核电磁脉冲, 频谱分析, 电场

Study on Spectrum Analysis and Spatial Field Distribution of Nuclear Electromagnetic Pulse

Shixin Wang

Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Mar. 14th, 2023; accepted: May 16th, 2023; published: May 23rd, 2023

Abstract

In order to study the spatial spectrum and electric field distribution of nuclear electromagnetic

pulse, the nuclear electromagnetic pulse is simulated by the double exponential function waveform formulated by the academic publishing house in 1976. The time domain parameters, spectrum and energy flow spectrum of the nuclear electromagnetic pulse waveform are analyzed. It is concluded that the spectrum range of nuclear electromagnetic pulse is 100 MHz, the energy flow ratio is 96% at 0.001~10 MHz, and the energy flow ratio is 99.8% at 100 MHz. According to the results of spectrum analysis, a model is established in the multi-physics simulation software COMSOL to simulate the spatial electric field distribution. It is concluded that at the frequency of 100 MHz, the spatial distribution of the electric field is large in the middle and small around. With the gradual increase of the propagation distance of the nuclear electromagnetic pulse, the electric field intensity gradually decreases. The attenuation rate of the electric field value in the middle of the same plane is faster than that of the electric field value around, and the spatial electric field distribution tends to be more and more uniform. At the same distance, with the increase of nuclear electromagnetic pulse frequency, the electric field distribution value gradually decreases and tends to be more evenly distributed.

Keywords

Nuclear Electromagnetic Pulse, Spectrum Analysis, Electric Field

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核电磁脉冲是高空核爆炸的重要现象之一，高空核爆炸产生的 γ 射线和X射线以光速由爆点向四周辐射，当 γ 射线和X射线进入大气层后，与空气中的原子撞击产生康普顿电子，康普顿电子会做径向运动，进而引起空气分子电离产生二次电子-离子对，从而形成电子流，在地磁场的作用下，电子流做加速运动，产生强烈的电磁辐射，从而形成脉冲[1]。

HEMP可分为早期(E1)、中期(E2)和晚期(E3)，其中，早期的场强最强，频谱最丰富，其电场强度高达数万伏每米，上升时间纳秒级，持续时间在1微秒内，频率在0.03~100 MHz范围内。中期电场强度幅值为百伏每米，要远远低于早期的电场强度，此阶段持续时间在1秒以内。晚期(衰末期)其电场强度已经衰减到毫伏每米，时间也从中期的1秒持续到上百秒，此时，频率也降低到了1 Hz内[2]。因此，最先引起研究者关注的是E1阶段的电磁脉冲，对核电磁脉冲的研究主要是E1阶段的电磁脉冲，核电磁脉冲也一般即是指的E1阶段。

近年来，许多学者对核电磁脉冲的特性展开了研究，文献[3]对不同标准的核电磁脉冲波形进行了特性分析，比较了不同标准的异同点。文献[4]和[5]对核电磁脉冲在不同环境下的电磁特性进行了研究分析。文献[6]分析了不同高度以及不同当量的核爆炸向外层空间传播的电磁脉冲源的特征。而对核电磁脉冲在空间中传播的电场分布研究较少。随着学者对核电磁脉冲的研究，各实验室和国家对电磁脉冲建模和计算制定了核电磁脉冲的标准[7]。其中，学术出版社制定的电磁脉冲带宽较宽，相当于100 t-TNT当量核爆炸产生的核电磁脉冲[8]。本文将展开对100 t-TNT当量的核电磁脉冲波形进行频谱分析，并根据频谱分析，对其空间电场分布进行研究。通过对空间电场分布的研究，可以为核电磁脉冲的空间防护提出理论依据。

2. 核电磁脉冲波形分析

2.1. 时域波形

未分类 HEMP 标准的特征在于理想化的双指数和高指数波形。HEMP 标准是将(时域和频域)多个可能的波形包络得到的, 其时域表达式为[9]:

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

式中 $E_0 = 5 \times 10^4$ V/m 为电场强度的峰值, $\alpha = 2.6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 和 $\beta = 1.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 为衰变常数、上升时间常数, $k = 1.04$ 为修正系数。

将参数带入公式(1)得出核电磁脉冲时域波形, 如图 1 所示, 核电磁脉冲时域上升沿时间为 7.8 ns, 下降沿时间为 1465 ns, 脉冲半高宽度($\tau \approx 485.5 \text{ ns}$)。因此, 核电磁脉冲具有陡峭的上升沿, 能产生一种瞬态的电磁干扰。

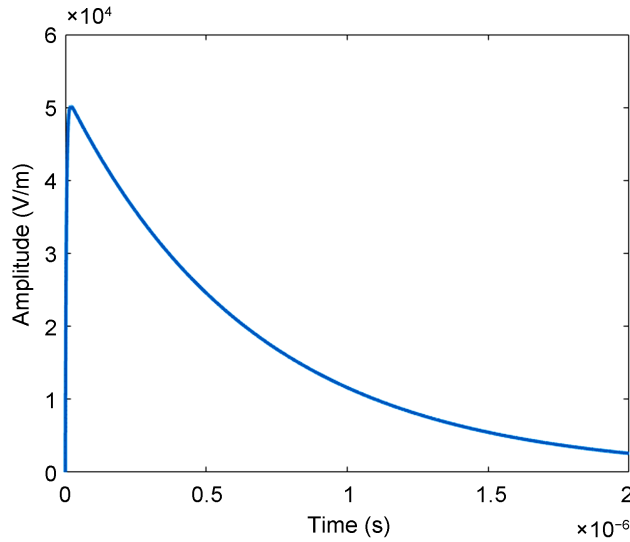


Figure 1. Time domain waveform of nuclear electromagnetic pulse

图 1. 核电磁脉冲时域波形

2.2. 频域分析

核电磁脉冲进行傅里叶变换获得频域, 频域表达式为:

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{E_0 k (\beta - \alpha)}{(\alpha + j\omega)(\beta + j\omega)} \quad (2)$$

根据帕斯瓦尔定理, 为了明确核电磁脉冲波形能量在频率分量中的分布, 采用能谱 $S(f)$ 来描述能流随频率的变化:

$$S(f) = \frac{2|E(f)|^2}{Z_0} \quad (3)$$

对公式 3 进行积分, 获得核电磁脉冲的总能流 W_t , 电磁脉冲在频率 f 处累计的能流为 W_f , 则归一化后的累积流能谱 W 公式为:

$$W = \frac{W_f}{W_t} = \frac{\int_0^f S(f) df}{\int_0^{+\infty} S(f) df} \quad (4)$$

Z_0 为自由空间阻抗波。

核电磁脉冲波形能够拆分为不同频率的正弦波，由此分析核电磁脉冲波形的谐波分量。

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (5)$$

其中

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (7)$$

式中， a_0 为直流分量， a_n 和 b_n 是余弦分量和正弦分量的幅值，周期 $T = 10^{-8}$ s， $\omega = 2\pi f$ 。

将核电磁脉冲时域波形进行傅里叶变换，获得核电磁脉冲的频域图。如图 2 所示。并通过公式(4)进行积分，获得核电磁脉冲的归一化累积能流曲线如图 3 所示。

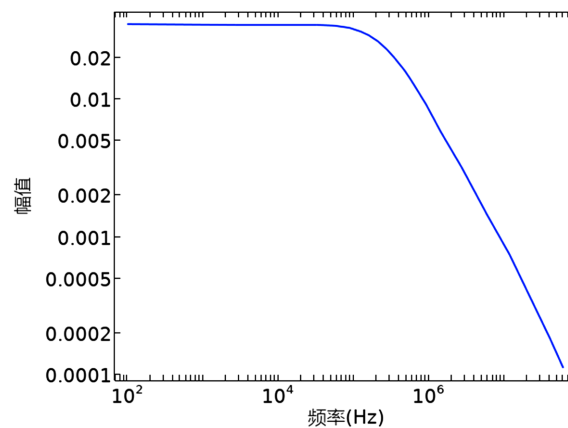


Figure 2. Spectrum diagram
图 2. 频谱图

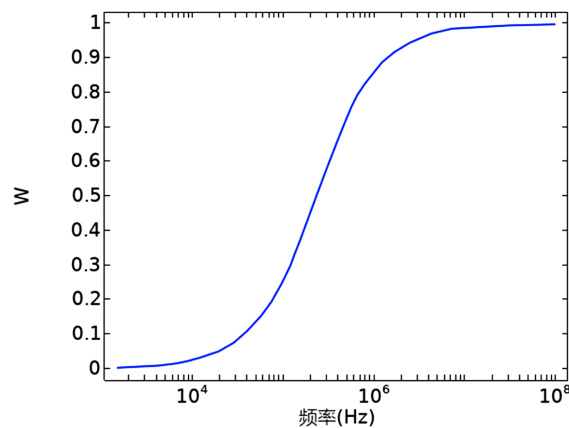


Figure 3. Normalized cumulative energy flow curve
图 3. 归一化累积能流曲线

从图 2 中可以看出,核电磁脉冲频谱波形在 100 kHz 左右时,频谱幅值开始逐渐下降,标准带宽在 1 MHz 左右,因此,此波形的标准带宽较窄。在 1 MHz~100 MHz 频率范围,波形幅值逐渐降低,频谱分量偏低,而频谱分量越少越易受到小孔耦合效应影响。因此,需要提高核电磁脉冲的频谱分量和带宽宽度,即缩短核电磁脉冲的上升沿时间、脉冲半高宽 τ 时间。图 3 核电磁脉冲的能量在 10 kHz 以前和 10 MHz 后曲线变化较为缓慢,在 10 kHz~10 MHz 内能量曲线变化较大。在 0.001~10 MHz 占比为 96%,在 100 MHz 频率时其能流占比达到了 99.8%。

通过对核电磁脉冲频谱分析,得出频率范围在 1 kHz~100 MHz,因此,本文将研究在 100 MHz 下,核电磁脉冲在不同位置空间电场强度分布情况。并根据傅里叶级数分析,求解出谐波的幅值为 13,931 V/m。

3. 核电磁脉冲的空间场分布

3.1. 电磁波传播理论

电磁波传播在数学上由麦克斯韦方程组表示,基本上是对物理定律的描述。这些方程与磁场和电场相对于空间和时间的变化有关。方程如下[10]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{8}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{9}$$

$$\nabla \cdot D = \rho \tag{10}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{11}$$

E 、 H 、 D 、 B 、 J 分别为电场强度、磁场强度、电通量密度、磁通量密度、电流密度。

从公式(8)~(11)可以推断出“电场”和“磁场”是相互依赖和时变的。电场和磁场结合在一起对彼此的后续生成产生影响,从而导致连续波传播。这些方程使我们能够计算出空间的电场强度。

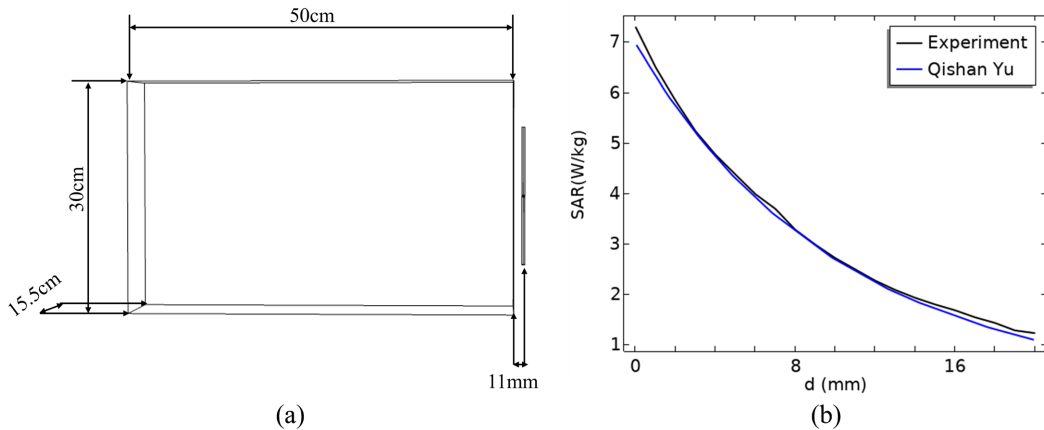


Figure 4. Verification of the mathematical model: (a) The verified model; (b) Comparison of the calculated SAR distribution with the SAR distribution obtained by Qishan Yu

图 4. 数学模型的验证: (a) 验证的模型; (b) 计算的 SAR 分布与 Qishan Yu 获得的 SAR 分布的比较

3.2. COMSOL 可行性验证

为了验证 COMSOL 仿真计算数值模型的准确性,通过 COMSOL 建立 Qishan Yu [11]使用的几何模

型, 并进行仿真分析, 将获得的数值结果与[11]的结论进行了验证。在验证案例中, 平面组织长宽高分别是 50、30、15.5 cm, 偶极子频率为 835 MHz, 它发射的辐射功率为 0.5 W, 研究 SAR 在在波传播方向 SAR 值随能量穿透深度的变化。取 y 轴距表面 0~20 mm 的 SAR 值结果, 将结果和 Qishan Yu 案例的结果绘制成曲线图, 如图 4 所示, 它清楚地表明本次结果与 Qishan Yu 的值具有良好的一致性。SAR 在波传播方向上呈指数下降。这种有利的比较为当前数值模型的准确性提供了信心。

3.3. 建立空间仿真模型

天线选取偶极天线, 由主辐射体、两个馈电结构组成, 是一种结构简单的基本线天线, 能够在水平上实现全向电磁辐射覆盖, 让水平和垂直极化都能取得较好的效果, 且能满足到电磁脉冲发射。

在多物理场 COMSOL 中建立偶极天线, 如图 5 所示。臂长 L 设置为天线的 $1/4$, 天线半径 r 设置为臂长的 $1/20$ 为, 两臂间隙(馈电点) a 设置为臂长的 $1/100$, 偶极天线采用的材质为铜。

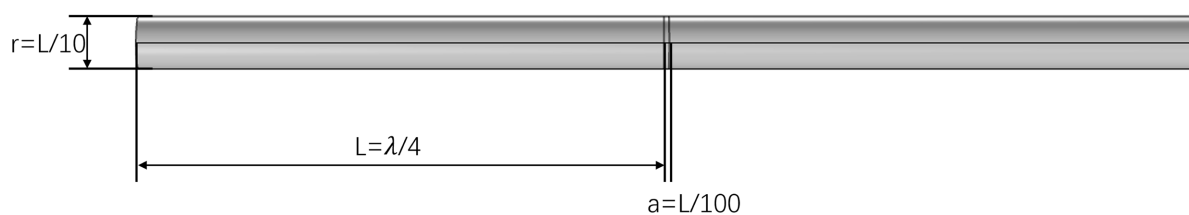


Figure 5. Antenna size

图 5. 天线尺寸

根据图 5 天线的尺寸, 在 COMSOL 软件上建立模型, 为了防止核电磁脉冲传播的边界处, 产生折射造成对空间进行二次辐射, 进而引起仿真计算误差, 因此, 建立空气域和 PML 层。添加材料, 设置物理场, 在两臂间隙处施加激励源, 进行简单的仿真计算, 其模型图如图 6 所示。对 100 MHz 谐波进行仿真计算, 由于核电磁脉冲电场测量点是处于近远场交界处。即距离 $r = 0.48$ m 处, 并汇总了 $x = 0.48$ m 的 yOz 平面绘制在图 7 所示。可以看出, 偶极天线在 $x = 0.48$ m 产生的电场强度值约为 13,931 V/m。

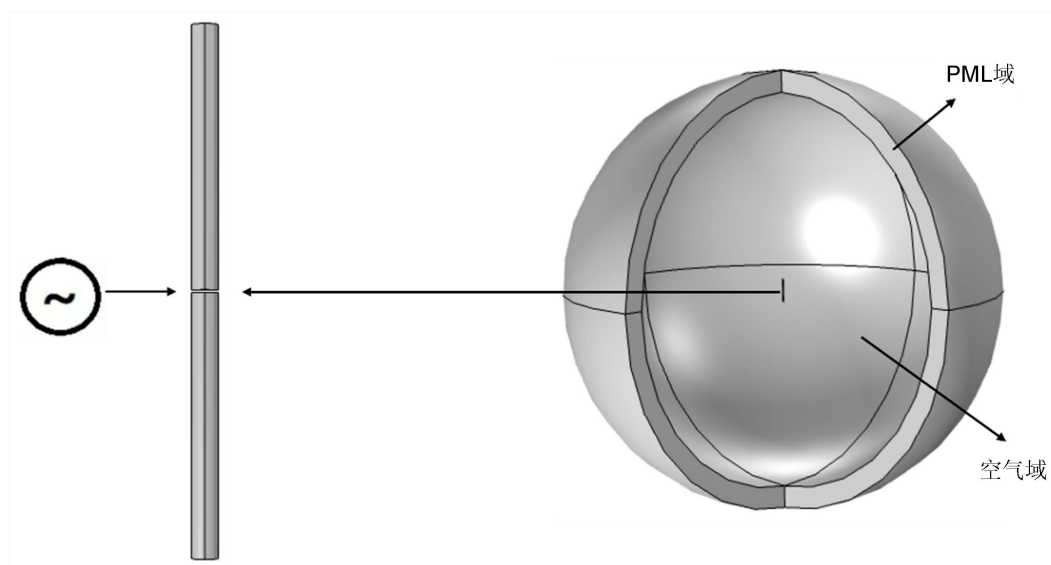


Figure 6. Antenna physical field modeling

图 6. 天线物理场建模

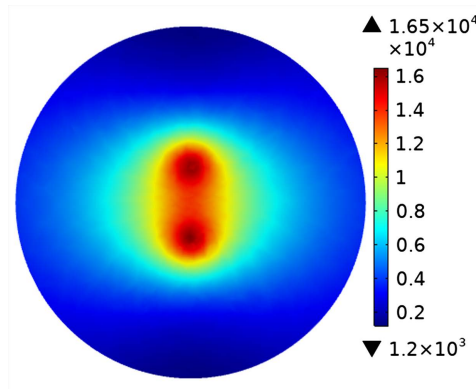


Figure 7. yOz plane electric field distribution
图 7. yOz 平面电场分布

3.4. 结果与分析

3.4.1. 不同距离的空间分布

为了计算 100 MHz 核电磁脉冲在不同距离下的空间电场的分布情况, 根据求解的核电磁脉冲谐波值, 将核电磁脉冲的谐波幅度激励到偶极天线馈电点上, 进行电磁辐射。通过多物理场仿真软件进行有限差分 (FDTD) 计算获得核电磁脉冲的在 $x = 1、10、20、50$ km 处的 yOz 平面的空间电场分布, 如图 8~11 所示。

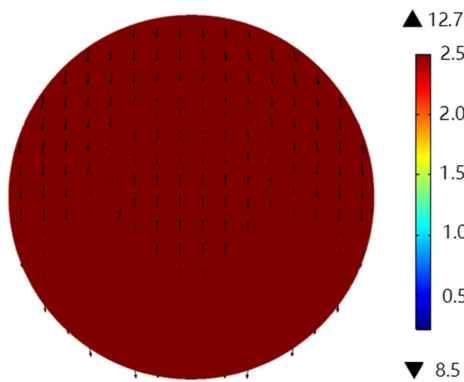


Figure 8. Electric field distribution in yOz plane at 1 km
图 8. 1 km 处 yOz 平面电场分布

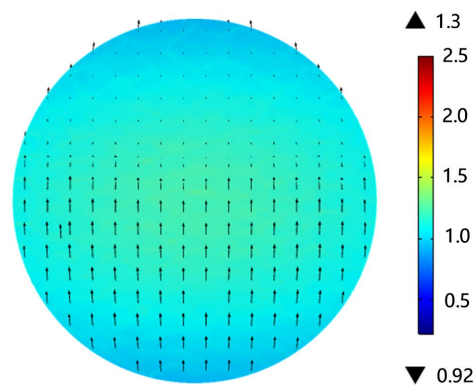


Figure 9. Electric field distribution in yOz plane at 10 km
图 9. 10 km 处 yOz 平面电场分布

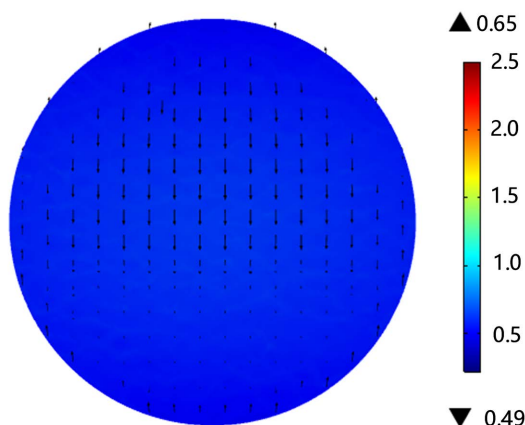


Figure 10. Electric field distribution in yOz plane at 20 km
图 10. 20 km 处 yOz 平面电场分布

图中黑色箭头是电场矢量分布，箭头指向是电场方向指向，可以观察到此处 yOz 平面的电场矢量分布，箭头密集的地方其电场强度值也相对大。通过观察图 8~11 可以看出，电场强度在 yOz 平面的空间分布的最大值在面的正中区域，整体呈现中间区域较大，并逐渐向四周减小的分布。并且水平方向上的值减小比垂直方向上更均匀，随着距离的增加，电场强度值逐渐减小，但中间电场强度的值衰减速度要快于四周的电场强度衰减速度。计算出在距离辐射源 1、10、20、50 km 处，电场强度值分别为 12.42 V/m、1.22 V/m、 6.13×10^{-1} V/m、 2.47×10^{-1} V/m。

通过对比 $x = 1、10、20、50$ km 处的 yOz 平面的空间电场最大值和最小值，可以得出在 1、10、20、50 km 的最大值分别是其最小值的 1.494、1.413、1.326、1.182 倍，最大值和最小值间的差距在逐渐减小，因此，随着核电磁脉冲传播距离的逐渐增加，其空间的电场分布越来越趋于均匀分布。由于在空间传播中，没有植被等障碍物阻挡电磁波，只有空间能量损耗，因此在传播上只受时间的影响，即随距离的变化成比例。如：在相同方向上，1 km 的电场值约是 10 km 处的 10 倍。

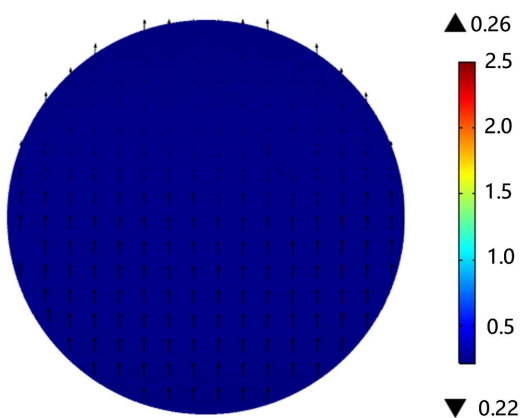


Figure 11. Electric field distribution in yOz plane at 50 km
图 11. 50 km 处 yOz 平面电场分布

3.4.2. 不同频率的空间分布

为了计算 10、20、50、100 MHz 下的空间电场的分布情况，根据公式(5)~(7)求解的核电磁脉冲个频率的谐波值，根据频率建立对应的天线，仿真计算距离天线 5 km 处的 yOz 电场分布图。如图 12~15 所示。

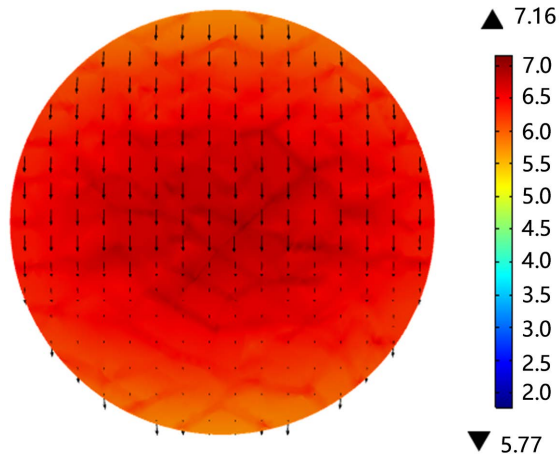


Figure 12. Planar electric field distribution at 10 MHz
图 12. 10 MHz 下平面电场分布

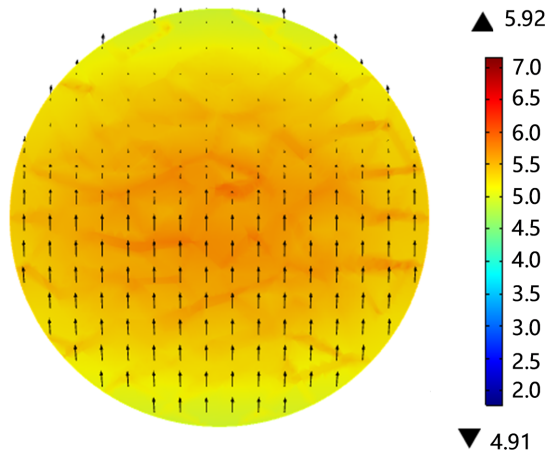


Figure 13. Planar electric field distribution at 20 MHz
图 13. 20 MHz 下平面电场分布

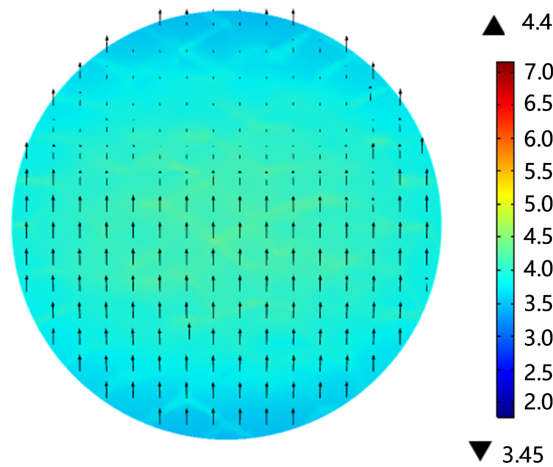


Figure 14. Planar electric field distribution at 50 MHz
图 14. 50 MHz 下平面电场分布

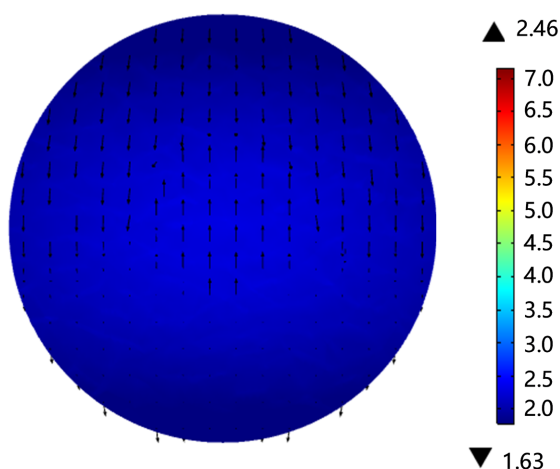


Figure 15. Planar electric field distribution at 100 MHz

图 15. 100 MHz 下平面电场分布

通过计算得出 10、20、50、100 MHz 在 5 km 处的电场值分别为 6.76、5.66、4.15、2.44 V/m，随着频率的增加，核电磁脉冲在相同距离处产生的电场强度分布值逐渐减小。在 10 MHz 时电场强度的最大值集中分布在正中间处，而在 100 MHz 时，电场强度分布几乎呈均匀分布。通过对比不同频率的空间分布图，得出：当频率逐渐增大时，在相同距离处产生的电场分布越趋向于均匀分布。这是由于天线在远场传播时，频率越高，在传播过程中越容易造成的损耗，随着距离的增加，其电场值较大的衰减速度快于电场值小的衰减速。因此，在相同距离下，频率越高，其电场分布越趋向于均匀分布，其空间分布的电场最大值和最小值相差值在逐渐减小。

4. 结语

本文通过分析核电磁脉冲的时域参数、频谱、能流谱，核电磁脉冲在 0.001~10 MHz 的能流占比 96%，在 100 MHz 范围内时能流占比为 99.8%。并通过多物理场仿真软件对核电磁脉冲进行建模仿真计算，得出在 100 MHz 频率下，其电场强度分布呈现中间区域较大，并逐渐向四周减小的分布。水平方向上的值减小比垂直方向上更均匀，随着核电磁脉冲传播距离的逐渐增加，电场强度值逐渐减小，同一平面中间电场分布值的衰减速度要快于四周的电场值衰减速度，其空间的电场分布越来越趋于均匀分布。当频率逐渐增大时，在相同距离处产生的电场分布越趋向于均匀分布。

参考文献

- [1] Longmire, C.L. (1978) On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EMC-20, 3-13. <https://doi.org/10.1109/TEM.1978.303688>
- [2] Overbye, T.J., Snodgrass, J., Birchfield, A., et al. (2022) Towards Developing Implementable High Altitude Electromagnetic Pulse E3 Mitigation Strategies for Large-Scale Electric Grids. 2022 *IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, 28 February-1 March 2022, 1-6. <https://doi.org/10.1109/TPEC54980.2022.9750778>
- [3] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 周辉, 孙蓓云. 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(8): 781-787.
- [4] 王明凯, 莫锦军, 章寅. 高空核爆近海面电磁脉冲辐射环境数值模拟与分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(S2): 192-199.
- [5] 柴焱杰, 孙继银, 赵利军. 近地面 HEMP 电磁环境特性研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(1): 210-212.
- [6] 孟萃, 陈雨生, 周辉. 爆炸高度及威力对空间核电磁脉冲信号特性影响的数值分析[J]. 计算物理, 2003(2):

173-177.

- [7] Li, Y., Wang, J., Zuo, Y., *et al.* (2020) Simulation of High-Altitude Nuclear Electromagnetic Pulse Using a Modified Model of Scattered Gamma. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **67**, 2474-2480.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3031320>
- [8] 赵玉研. 高功率电磁脉冲对传输线的耦合研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [9] Giri, D.V. and Prather, W.D. (2013) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Risetime Evolution of Technology and Standards Exclusively for E1 Environment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **55**, 484-491.
<https://doi.org/10.1109/TEMC.2012.2235445>
- [10] Zhang, J. and Zhang, Y.R. (2018) Using a Second-Order Integral Equation Method to Study the High-Altitude Nuclear EMP. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **61**, 1483-1491.
<https://doi.org/10.1109/TEMC.2018.2857467>
- [11] Yu, Q., Gandhi, O.P., Aronsson, M., *et al.* (1999) An Automated SAR Measurement System for Compliance Testing of Personal Wireless Devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **41**, 234-245.
<https://doi.org/10.1109/15.784158>