圆台 - 线栅型水平极化电磁脉冲模拟器的 仿真分析

张 饶¹,段艳涛¹,扶庆枫¹,石立华¹,陈海林¹,胡南松²,王大略²

¹陆军工程大学电磁环境效应与光电工程重点实验室, 江苏 南京 ²解放军73047部队, 安徽 滁州

收稿日期: 2024年4月21日; 录用日期: 2024年5月14日; 发布日期: 2024年5月21日

摘要

以双键-线栅型水平极化天线为原型,使用不同大小的圆柱体替换双锥的锥尖,设计出圆台-线栅型水 平极化天线,并利用CST MWS电磁仿真软件计算了当激励源为双指数波时的两种天线结构的输出波形。 将两种天线模型的输出波形分别与高空核电磁脉冲标准波形进行对比,结果显示:圆台-线栅型水平极 化天线模型的仿真结果在主要参数上更贴近高空核电磁脉冲标准波形,其中,输出波形的场强峰值提升 了2.47%,上升沿(脉冲从峰值的10%到峰值的90%的时间宽度)误差由20.40%减小为0.04%,半高宽 误差由8.26%减小为1.46%。

关键词

圆台-线栅型,双锥-线栅型,水平极化天线,峰值,上升沿,半高宽

Radiation Charateristics Analysis of Frustum-Wire Grid Horizontal Polarizad Antenna

Rao Zhang¹, Yantao Duan¹, Qingfeng Fu¹, Lihua Shi¹, Hailin Chen¹, Nansong Hu², Dalue Wang²

¹National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects and Electro-Optical Engineering of Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu ²The 73047 Troops of PLA, Chuzhou Anhui

Received: Apr. 21st, 2024; accepted: May 14th, 2024; published: May 21st, 2024

Abstract

A frustum-wire grid horizontally polarized antenna was designed by replacing the coning angle with a cylinder of different length on the basis of a biconical-wire grid horizontally polarized antenna. When the excitation source waveform is double exponential wave, the output waveforms of the two types of antennas are calculated by simulation software of Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS). Compared the output electric field waveform of the two structures with the high-altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP) standard waveform, such renovation makes the peak of electric field rising 2.47%, the error in the rise time (the time width of the pulse from 10 percent to 90 percent of the peak) declining from 20.40% to 0.04%, and the error in the Full Width Half Maximum (FWHM) decreasing from 8.26% to 1.46%, which means closer to HEMP standard waveform in terms of main parameters.

Keywords

Frustum-Wire, Biconical-Wire, Horizontally Polarized Antenna, The Peak, The Rise Time, FWHM

Copyright © 2024 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/

CC O Open Access

1. 引言

水平极化电磁脉冲模拟器能够模拟高空核电磁脉冲(HEMP)辐照环境,可以为各类系统或设备等提供 特定的电磁脉冲环境,是电磁脉冲环境模拟与生成技术的重要组成部分[1] [2] [3] [4]。2010年,Bailey采 用双锥 - 平面线栅天线替换了双锥 - 椭圆笼型天线,解决了电流负反射引起的辐射场脉冲宽度偏窄的问 题,改善了水平极化电磁脉冲模拟器的输出波形[5]。该型天线得到了广泛分析与讨论[6] [7] [8],但不少 缺点也较为突出,例如对脉冲源的输出功率要求高,天线制作完成后生成的电磁环境较难改变等。鉴于 此,笔者对该型天线进行了改进,设计出圆台 - 线栅型水平极化天线,使得输出的波形峰值更高,上升 沿和半高宽更贴近 HEMP 标准波形[9]。图 1 为基于 CST 微波工作室建立的两种天线模型的对比图。



Figure 1. Comparison diagram of biconical-wire grid antenna (left) and frustum-wire grid antenna (right) 图 1. 双锥 - 线栅型天线(左)和圆台 - 线栅型天线(右)对比示意图

2. 建立模型及参数

 Table 1. Main parameters of frustum-wire grid horizontal polarizad antenna model

 表 1. 圆台 - 线栅型水平极化天线模型主要参数值

参数描述	参数的取值	参数描述	参数的取值
圆台中心距离原点 O 的高度 H	5000 mm	插排横向距离 h	18,000 mm
圆台下底面半径 R	1000 mm	干燥地的厚度 g	500 mm
圆台半锥角 α	30.7°	干燥地的相对介电常数 ε	2.44
圆柱体间的间隙 d	100 mm	干燥地的相对磁导常数 μ	1
排插总宽度 w	27,000 mm	干燥地的电导率σ	0.0014 S/m^{-2}



Figure 2. Schematic diagram of antenna with frustum-wire grating structure 图 2. 圆台 - 线栅型天线结构示意图



Figure 3. Voltage waveform of excitation source 图 3. 激励源的波形图

圆台-线栅型水平极化天线模型为对称结构,由圆台、圆柱、传导线栅、插排、地面等构成,如图 2 所示。圆台内部中空,两端开口,圆台无缝连接圆柱体。单侧传导线栅为10 根金属圆柱线栅,一端连接到圆台下底面圆圈,另一端连接到地面排插,由插排接地,插排纵向分布均匀。接地电阻为 150 Ω。整个模型(地除外)均采用理想导体材质。模型的其他主要参数值见表1。激励源采用集总电压源,波形为双指数波,输出电压U峰值为250 kV,上升沿为0.9 ns,半高宽为19.5 ns,如图3 所示。频率范围设定为0~300 MHz。离散端口处于圆柱体内侧圆面,从圆柱体底面的圆心到另一圆柱体底面的圆心。边界条件: Z_{max}为 open (add space),其他方向为 open。

3. 仿真与分析

为了对电场环境做更好的分析,需要对该模型的电场分别进行波形分析和环境分析。为此,划定模 拟器右下方某长方体区域为观测区域,并在长方体 8 个顶点上设置探针,坐标分别为: P₁ (0, 0, 4000)、 P₂ (1000, 0, 4000)、P₃ (1000, -1000, 4000)、P₄ (0, -1000, 4000)、 P₅ (0, 0, 3500)、P₆ (1000, 0, 3500)、P₇ (1000, -1000, 3500)、 P₈ (0, -1000, 3500)。规定 E_p表示输出电场峰值,t_r表示上升沿,t_w表示半高宽。

3.1. 输出电场的波形分析

如图 4 所示, $P_1 \sim P_8$ 的电场波形均为双指数波,波形走势的一致性较好。由于距离天线的距离不同, 各点的电场波形的上升和下降的起点不同。由表 2 可得, $E_p \ge 50 \text{ kV/m}$, $t_r \le 3 \text{ ns}$, $t_w \le 30 \text{ ns}$ 。 E_p 的取值 范围为 50.410 kV/m~90.802 kV/m, P_4 最大, P_6 最小,该区域电场均匀性 $\le 6 \text{ dB}$,均匀性较好。 t_r 最小为 0.9698 ns,最大为 1.1300 ns,偏差不超过 16.5%,且可以通过缩小测试区减小 t_r 的偏差。将 P_1 、 P_4 和 P_5 作对比, P_1 的 E_p 较大但 t_r 最大, P_4 的 E_p 最大但 t_r 最小, P_5 的 E_p 最小但 t_r 较大。上述表明:上升沿的快 慢和峰值的大小没有关系,各点位的电场增长率并不均匀的。 t_w 最小值为 17.707 ns,最大值为 18.276 ns, 偏差不超过 3.2%。可以认为,半高宽与点位位置无关,半高宽数值稳定。因此,输出的电场波形存在如 下规律:第一,电场场强的峰值大小与点位位置有关,一般距离模拟器越近,峰值场强越强。第二,上 升沿和半高宽的大小与点位位置无关,与峰值也无关,各点位电场增长率并不均匀。第三,当模型结构 保持不变时,上升沿和半高宽变化较小,空间内的电场波形的一致性较好,波形走势趋于相同。

探针位置 ———	电场波形的主要参数				
	$E_p/10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$	t _r /ns	t _w /ns		
P ₁	9.0189	1.1300	18.068		
P_2	6.4113	1.0896	18.145		
P ₃	6.4366	1.0279	18.102		
P_4	9.0802	0.9698	18.276		
P ₅	6.0464	1.1238	17.928		
P_6	5.0410	1.0799	18.186		
P_7	5.0774	1.0412	17.707		
P_8	6.0613	1.0216	17.844		

Table 2. Main parameters of E-field waveforms at different points **表 2.** P₁~P₈的电场波形的主要参数值



Figure 4. Comparison diagram of E-field waveforms at different points 图 4. P₁~P₈的电场波形对比图

3.2. 输出电场的环境分析

图 5 为天线激励发出后 46 ns 时,天线模型在 x = 0 mm、y = 0 mm 和 z = 5000 mm 的电场截面图。较大的电场覆盖了天线周边区域,数值均在 1 kV·m⁻¹以上,并且围绕圆台对称中心呈放射状;一般离天线中心越近,颜色越深,电场峰值越大,最高可达 100 kV·m⁻¹。当辐射向外扩展的时候,内部场强逐渐弱化,外部场强逐渐扩张变大。同一高度监测点的电场峰值,激励源附近的要大于远离激励源的。天线周围的要大于远离天线的。并且,天线下方存在的大部分空间的场强差别不大,该空间的电场的均匀性较好。









4. 输出 HEMP 标准波形的电场

取 P (0, 0, 2875)为观测点,由以上总结的规律可得,P 点波形的主要参数能够表征该模型输出的电场 环境。调整 α = 48.8°,尝试对1取不同的值,得到 P 点处的输出波形如图 6 所示,波形的主要参数如表 3 所示。根据 IEC 标准[9],HEMP 为双指数波,峰值场强至少达到 50 kV/m,波形前沿 2.5 ns、半高宽 23 ns。圆台-线栅型水平极化天线模型(1 = 90 mm)的输出电场波形的幅值为 55.187 kV/m,上升沿为 2.5010 ns,半宽为 23.338 ns;双锥-线栅型水平极化天线模型(1 = 0 mm),P 点的输出电场波形的幅值为 53.950 kV/m,上升沿为 3.3010 ns,半宽为 24.900 ns。且两种天线模型的输出波形的脉宽和波尾的一致性 较好。与 HEMP 标准波形相对照[1],前者相较于后者,在输出电场波形的峰值上由增大 7.90%提升到 10.37%, 上升沿误差由 20.40%缩减到 0.04%, 半脉宽误差由 8.26%缩减到 1.46%。试验结果表明: 圆台 - 线栅型水平极化天线的输出电场环境比双锥 - 线栅型水平极化天线更贴近 HEMP 标准波形。



Figure 6. E-field waveforms of P point under different conditions 图 6. 不同情形下 P 点的输出电场波形图

Table 3. Main parameters of E-field waveforms with different values of l at P point **表 3.**1 取不同值时的 P 点的输出电场波形的主要参数值

激励源的主要 参数	输出波形的主要 参数	l = 0 mm	l = 80 mm	1 = 90 mm	l = 100 mm	l = 180 mm	l = 190 mm
U _p (200 kV)	E _p (10 kV/m)	5.3950	5.4887	5.5187	5.5249	6.6819	6.8467
t _r (2.4615 ns)	t _r (ns)	3.3010	2.7408	2.5010	2.2386	2.4931	2.5681
t _w (22.982 ns)	t _w (ns)	24.900	23.552	23.338	23.203	19.545	19.085

5. 总结

本文以双锥-线栅型水平极化天线为原型,使用不同大小的圆柱体替换双锥的锥尖,设计出圆台-线栅型水平极化天线,利用 CST MWS 电磁仿真软件计算了当激励源为双指数波时的两种天线结构的输 出波形。仿真结果表明:圆台-线栅型水平极化天线的输出波形比双锥-线栅型水平极化天线的输出波 形的幅值更大,输出效率更高,在上升沿、半脉宽等主要参数上更贴近 HEMP 标准波形。通过变换不同 大小的圆柱体就能调整输出波形的主要参数,从而改变天线输出的电场环境,因此,圆台-线栅型水平 极化天线模型的构想具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 傅海军, 张维刚, 岳思橙, 等. 系统级电磁脉冲模拟试验技术[J]. 现代防御技术, 2018, 46(3): 127-132.
- [2] 金晗冰, 寇科男, 戴弃君, 等. 水平极化有界波电磁脉冲模拟器仿真与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(12): 86-92.
- [3] 王鹏飞, 刘恩博, 李贤灵, 等. 一种强电磁脉冲模拟器的仿真及验证研究[J]. 现代电子技术, 2023, 46(22): 28-32.

https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2023.22.006

- [4] 吴刚, 贾伟, 王海洋, 等. 高空核电磁脉冲模拟器研制进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53(7): 97-109.
- [5] Bailey, V., Carboni, V., Eichenberger, C., et al. (2010) A 6-MV Pulser to Drive Horizontally Polarized EMP Simulators. IEEE Transactions on Plasma Science, 38, 2254-2258. <u>https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2065245</u>
- [6] 朱湘琴, 吴伟, 王海洋. 大型双锥椭圆笼形天线关键参数的影响分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(1): 127-135. https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019103001
- [7] 肖晶, 吴刚, 谢霖燊, 等. 线栅参数对双锥-平面线栅水平极化辐射波模拟器的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(8): 1708-1715.
- [8] 王皓琰, 李俊娜, 龚渝涵, 等. 双锥-线栅型水平极化天线辐射特性研究[J]. 现代应用物理, 2022, 13(4): 175-181.
- [9] (1996) Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 2: Environment-Section 9: Description of HEMP Environment-Radiatied Distribution Basic EMC Publication: IEC 61000-2-9. International Electrotechnical Commission, Genève.