

应用于5G通信基站的防雷天线设计及防雷性能研究

郭明¹, 刘昆¹, 杜雨谔¹, 孙筱枫¹, 董志诚²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 西藏大学信息科学技术学院, 西藏 拉萨 850000)

摘要:闪电电磁脉冲是自然闪电放电过程中一种强电磁脉冲。通信基站遭受闪电袭击的事件中, 大多数都是闪电直接击打在通信基站的铁塔上并泄放至大地, 但对天线后端造成损毁的研究较少。随着5G基站的大规模建设, 大量有源电路和模块被安置在天线后端, 闪电击中铁塔时释放的闪电电磁脉冲能极易通过天线耦合至后端设备并造成损毁。基于极化可重构技术设计一种应用于5G基站的防雷天线。为探究所设计天线在闪电通道附近的耦合效应并分析其在防护状态下对闪电电磁脉冲的抑制效果, 基于闪电回击模型与Heidler雷电流函数模型, 结合简单管塔模型建立闪电通道-铁塔-天线模型, 通过不同极化方式天线对闪电电磁脉冲的耦合效应的研究, 讨论分析所设计天线的不同极化方式对抑制闪电电磁脉冲能量的能力。

关键词:雷电电磁脉冲; 5G天线; 极化可重构; 防雷天线

中图分类号: TN821

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.007

0 引言

雷电电磁脉冲(lightning electromagnetic pulse, LEMP)^[1-2]是雷电电磁效应所引起的一种极具危险性的电磁脉冲。雷电下行过程中携带的电流具有极高的电流峰值和陡度, 这种瞬时电流会产生瞬变的电磁场, 在电磁场的一定空间内的金属导体会感应出较大的感生电动势^[3-4]。由于在雷电产生的过程中闪电回击时间占据总雷暴云形成时间的一小部分, 因此在回击发生之前雷暴先导电力铁塔、通信铁塔及传输线等导体上会积累大量的异性电荷^[5]。在闪电回击发生之前, 该异性电荷与先到通道内的电荷相互束缚处于动态平衡的状态。当下行先导接近地面时候产生回击放电, 地面积累的大量电荷与通道内的电荷放电中和变小时, 在导体内的异性电荷此时失去与其束缚的通道电荷沿着传输线运动, 形成极高的过电压波, 以脉冲的形式近似于光速的速度向导线两端传播, 对到线两端的电子电力设备产生巨大的危害^[6-9]。

基站天线作为通信网络覆盖和组网的重要部件, 为增加单基站的覆盖范围通常被安置在高楼顶或者位于制高点的铁塔上端, 由于通信铁塔上端的避雷针的保护, 因此基站天线被闪电直接击中的概率非常低^[9-10], 但是在闪电击中通信铁塔时, 铁塔内传导到高陡度、高幅值电流会在周围的场产生剧烈的电磁辐射, 由于强电磁脉冲的持续时间较短, 例如雷电首次回击过程约6 μ s, 因此更加关注电磁脉冲发生脉冲对器件

的危害, 近年研究表明, 天线后端在闪电通道附近对雷电电磁脉冲的耦合电压能高达几十到几百伏, 足以干扰甚至损坏天线后端高频电子设备^[11]。

King等^[12]对具有40 m圆柱塔电信系统中的瞬态电流进行分析。模拟结果显示外部导体中的电流比其他导体中的电流更大, 这些结果为设计有效的防雷保护和选择适当的保护设备提供指导原则。Luk等^[13]研究在闪电电磁脉冲干扰下, 机载通信天线端口的耦合能量足以干扰或损坏接收器。研究还发现, 由于LEMP的能量主要集中在低频范围, 机载通信设备特别容易受到电磁脉冲的干扰和损坏。因此, 有必要在机载天线端口进行电磁脉冲保护。Wu等^[14]研究了斯里兰卡48个通信和广播塔站点的雷电防护情景, 结果表明, 在金属塔楼上, 无论是否安装了空气终端或下行导体, 直接击中天线结构的雷击是罕见的。然而天线侧的闪电弧现象极有可能发生。

随着第五代通信技术快速发展, 天线的小型化和射频模块的集成化进一步提高, 并在第五代通信基站中, 射频部分从上一代的远端射频单元迭代成集成在天线系统中的T/R射频收发单元并被放置在铁塔高处, 因此5G天线与后端收发设备更容易受到雷电电磁脉冲的影响, 天馈线防雷方式在新一代通信基站天线中亟待改进和提高^[15]。但是目前针对于基站通信中天线在雷暴天气下对非直击雷电的防御研究和探讨很少, 因此本文根据闪电电磁脉冲的特点, 研究设计应用于5G通信的极化可重构防雷天线并分析讨论其在雷电灾害环境下天线对闪电电磁脉冲的防护效能。

1 仿真模型

1.1 闪电-铁塔模型

目前闪电通道模型大多是闪电通道与大地相连并使用电流源激励,但是在闪电击中铁塔的过程中,闪电通道底端与通信铁塔尖端接触并通过通信铁塔本身最终传导至大地。此外由于电流源具有无限大的内阻,雷电电流会在铁塔内震荡,这不符合实际情况,因此本模型采用电压源作为激励,使内阻无限小^[16-17]。模型示意图如图1所示,模型包括闪电通道、激励源、通信铁塔和地面,其中闪电通道等效为由电晕鞘包裹的电晕核,通信铁塔采用高30 m的金属圆柱进行等效,大地等效为面积为5 m×5 m理想金属平面。

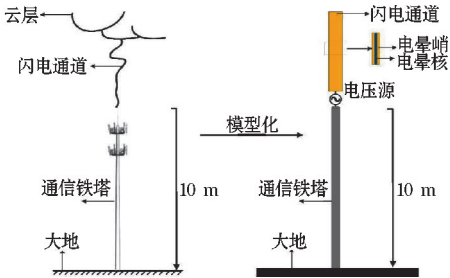


图1 闪电-铁塔模型示意图

为得到电压激励信号,常见模型有双指数基底模型、冲激函数基底模型和 Heidler 基底模型,由于 Heidler 函数在时间为 0 时的导数是连续的,避免了双指数函数和冲激函数出现的 0 时激励不连续现象^[18],因此选择 Heidler 基底模型作为基底电流,如下所示:

$$i(0,t)=(I_0/\eta)[(t/\tau_1)^n/(1+(t/\tau_1)^n)]\exp(-t/\tau_2)$$

式中: I_0 为电流的峰峰值, η 为基底电流的峰值修正系数, n 为变化因子, τ 为时间常数。为得到符合模型的准确时域 Heidler 电压激励波形,在模型仿真初期,首先采用高斯脉冲作为模型的电压源激励,通过计算得到模型的时域电压与时域电流,然后通过傅里叶变换得到对应的频域电压与频域电流,通过电压与电流的频域计算得到闪电通道-铁塔模型的频域电流,将频域电流与之前计算得到的频域阻抗做卷积后得出电压源激励的频谱波形。随后将 Heidler 函数的雷电电流进行傅里叶变换得到 Heidler 函数的频域雷电电压最后,通过对频域上的电压做傅里叶反变换得出 Heidler 电流在本模型中与之相对应的激励电压,用此电压作为电压激励源的激励。在模型中计算时,电压源中产生的电流就是 Heidler 函数电流。该过程的计算示意图如图2所示。

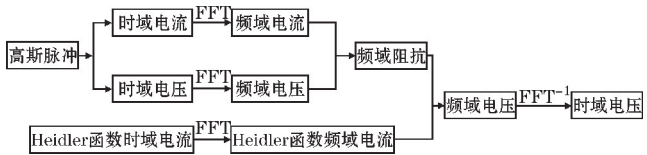


图2 电源激励获取图

根据国际电工委员会(IEC)关于雷击过程中的参数设置标准如表1所示。

表1 不同回击模式下的参数

模式	I_0/kA	η	τ_1/ns	τ_2/ns
首次回击	200	0.93	10	350
继后回击	50	0.93	0.25	100

从表1可以看出,首次回击具有更高的电流峰值及更大的时间常数,因此首次回击具有更大的衰减速度。为验证是否在高频继后回击的峰值是否会超过首次回击,将 Heidler 基底的首次回击电流与继后回击电流进行傅里叶变换频域归一化,如图3所示,在90 kHz 后继后回击的归一化电流大于首次回击而首次回击的归一化电流趋近于 0,因此继后回击对 5G 通信基站的雷电耦合效应影响更大。

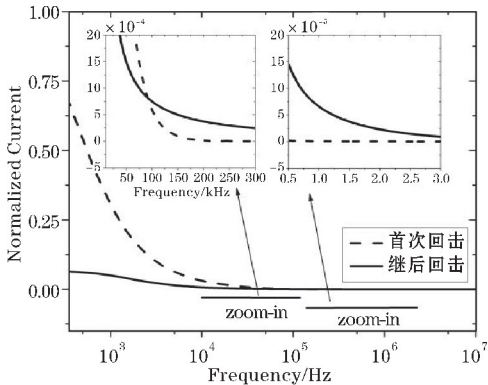


图3 Heidler 电流归一化频谱图

1.2 天线模型

为适应新一代基站天线对天线高带宽、小型化的要求,对微带贴片进行改进,引入缝隙和异形 E 型结构,改变电流在天线贴片的路径,减小天线体积尺寸同时展宽天线的带宽。而馈电网路部分采用四端口输入,通过开路短路谐振环进行馈电,使天线具有良好的带外抑制性能,并在末端馈电微带线加载 PIN 开关,通过 PIN 开关实现极化重构和移相功能,天线的结构和参数如图4所示。天线在馈电网络中引入 PIN 开关,如图4(a)所示,D1-4 是射频 PIN 控制通路的开启和关闭。其等效电路如图4(b)所示,在 CST 软件中利用集总元件等效射频开关。在不同导通与截止的情况下天线极化工作模式如表2所示。

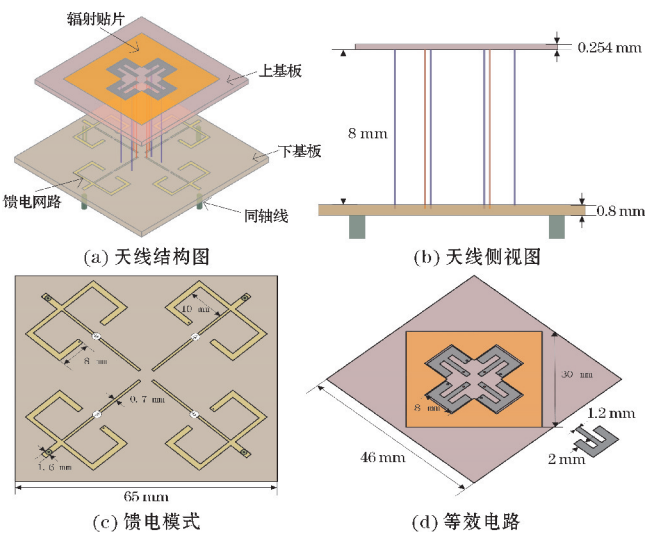


图4 天线结构及尺寸

表2 天线的极化工作模式

极化方式	D1	D2	D3	D4
线极化1	ON	OFF	OFF	ON
线极化2	OFF	ON	ON	OFF
圆极化	ON	ON	ON	ON

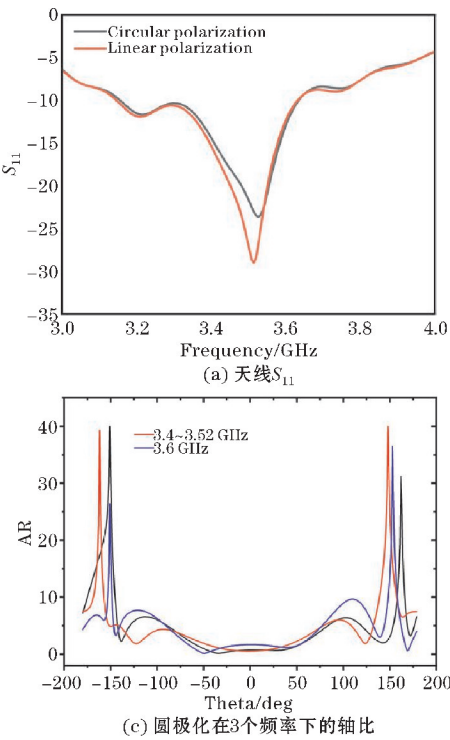


图6 天线基本性能参数

1.3 仿真模型可靠性验证

在基于人工引雷的闪电电磁脉冲耦合效应实验中,采集巴伦天线耦合电压,实验场地和通道模型使用简化后的铁塔模型如图7(a)所示。在简化的闪电通道-铁塔模型中进行仿真验证如图7(b)所示。由于人工引雷实验中,所使用的光端机数据采样率为

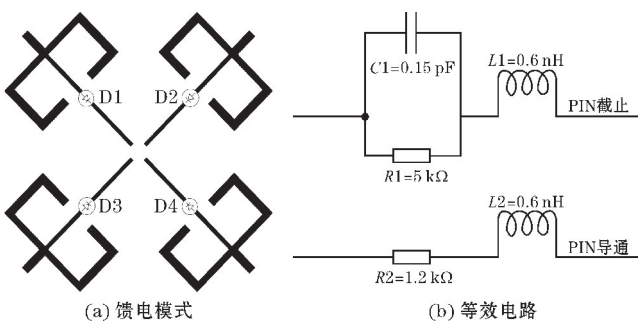


图5 馈电模式与等效电路

当天线工作在线极化和圆极化时, $|S_{11}| < -10$ dB 的频段宽度为480 MHz与490 MHz,二者的相对带宽为14.14%和14.45%,如图6(a)所示。此外合成两路线极化时,天线在3.22~3.75 GHz的轴比小于3 dB,如图6(b)所示。3个频段下的轴比和角度的关系图显示天线处于圆极化工作模式下的辐射角度均大于120°,符合基站天线要求,如图6(c)所示。天线的两种工作模式下的方向图如图6(d)所示,天线最大增益为7.21 dBi。

20 MHz,所示实验数据难以对闪电的高频特征进行细致的描述。这里对仿真计算的耦合电压进行降低采样率处理,使其与采集数据采样率一致。由图8可以看出,仿真计算的耦合电压与实验采集到的电压无论是在数值上还是在波形上都能较好地吻合。由此可见,本文所构建的回击模型在模拟计算闪电通道附近天线的耦合效应具备可靠性。

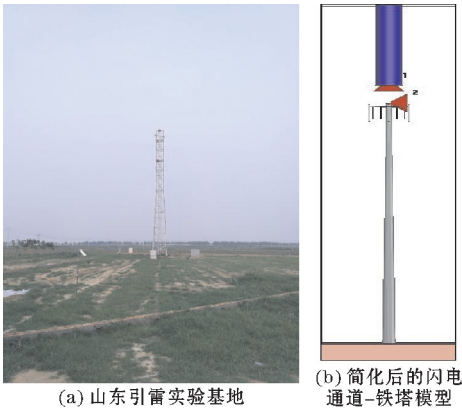
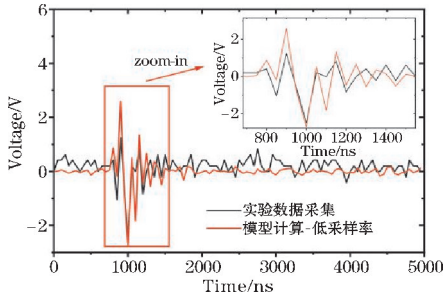
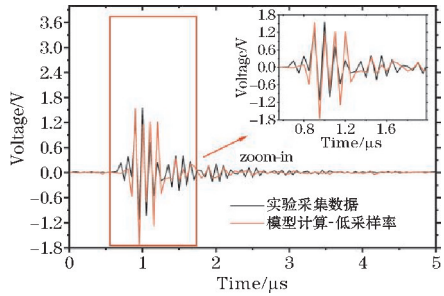


图7 实验与仿真模型示意图

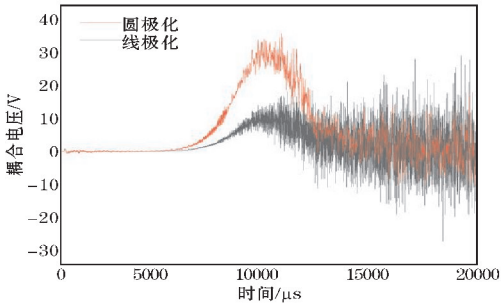


(a) 巴伦垂直天线耦合电压

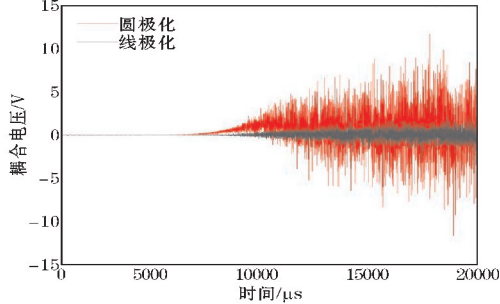


(b) 巴伦水平天线耦合电压

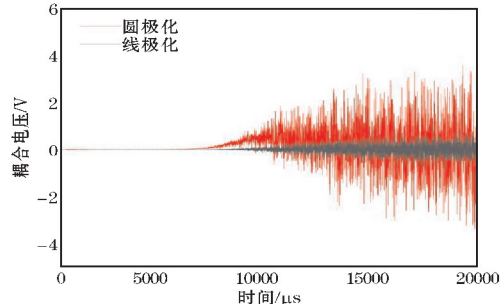
图8 模型计算与实验采集耦合电压比较



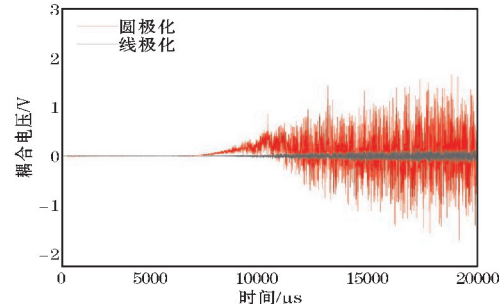
(a) 30 m处天线耦合电压



(b) 25 m处天线耦合电压



(c) 20 m处天线耦合电压



(d) 15 m处天线耦合电压

图9 不同高度下首次回击对天线耦合效应

2 防雷天线耦合效应研究

基于闪电通道及天线模型,将天线放置在距离地面高30 m、25 m、20 m、15 m处,距离铁塔1 m处并在天线馈线后端添加电压监视端口,研究天线在首次回击和继后回击时的闪电电磁脉冲耦合电压。

2.1 首次回击对天线耦合效应

当天线处在铁塔顶端时,圆极化状态的峰值电压为35.6 V,线极化状态的峰值电压为10.7 V。当天线高度下降5 m、10 m和15 m后,圆极化状态的峰值电压分别为11.54 V,5.4 V,1.9 V;线极化状态的峰值电压为1.92 V,0.67 V,0.43 V。由于首次回击的高频分量较低,因此在顶端天线耦合电压最大仅为35.6 V并随着高度的降低逐渐减少。无论在哪个采样点,天线处在线极化工作状态时能抑制 61% ~ 83% 闪电电磁冲能量。由此可以看出,所设计的防雷天线在防护状态下对闪电电磁脉冲具有良好的屏蔽性能。处在不同工作状态时不同高度下首次回击对天线的耦合电压如图9所示。

2.2 继后回击对天线耦合效应

当天线放置在铁塔顶端时,圆极化状态下耦合电压达72 V,在线极化状态下耦合电压达20 V;在25 m时圆极化状态下耦合电压达38 V,线极化工作状态下耦合电压达6 V;在20 m时圆极化状态下耦合电压达13 V,线极化工作状态下耦合电压达3 V;在15 m时圆极化状态下耦合电压达7 V,线极化工作状态下耦合电压达2 V。由此可以看出天线处在线极化工作状态下能屏蔽 72% ~ 84% 的闪电电磁脉冲能量,处在不同工作状态时不同高度下继后回击对天线的耦合电压如图10所示。

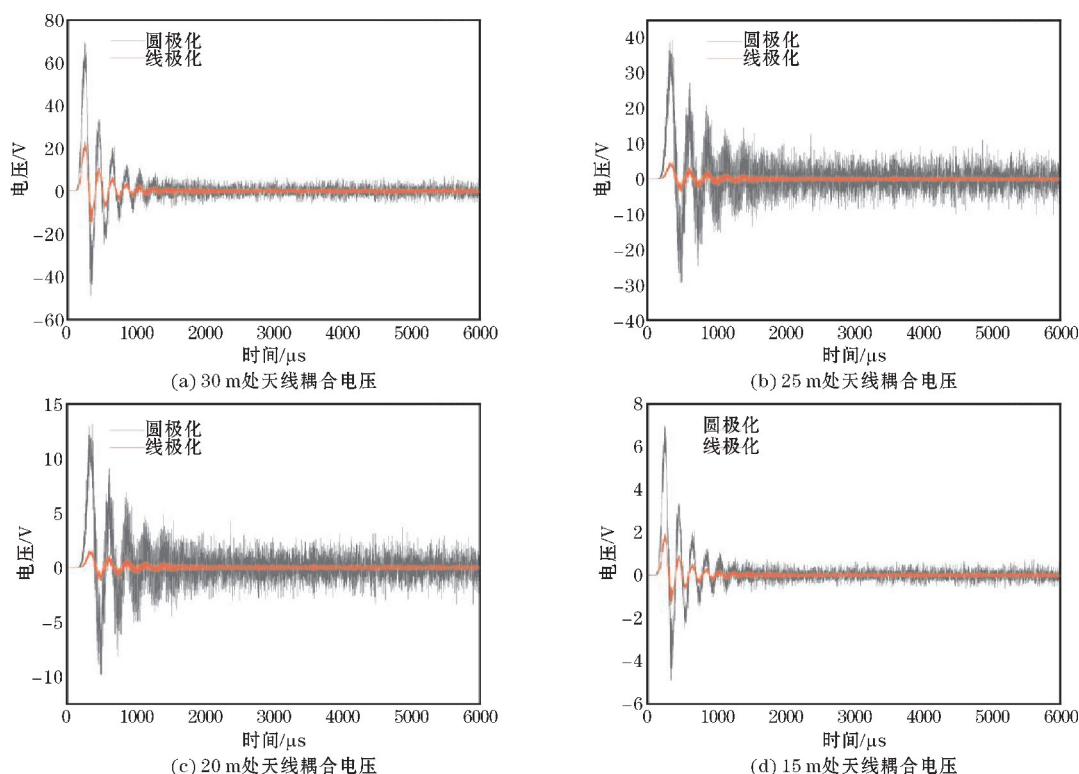


图10 不同高度下继后回击对天线耦合效应

3 结束语

通过所设计的天线对首次回击和继后回击闪电电磁脉冲耦合效应的分析讨论,通过两种圆极化在对闪电电磁脉冲耦合电压波形与天线防护状态下对闪电电磁脉冲耦合电压波形进行对比分析,分析其在不同的距地高度,距离铁塔不同水平距离对闪电电磁脉冲能量的抑制效果,最后从分析结果看出,防护状态下的天线对闪电电磁脉冲有着极好的抑制能力。

参考文献:

- [1] Rakov V A, Uman M A, Raizer Y P. Lightning: Physics and Effects [J]. Physics Today, 2004, 57: 63-64.
- [2] Bazelyan E M, Raizer Y P. Lightning Physics And Lightning Protection [M]. 2000: 1-21.
- [3] Rakov V A, Rachidi F. Overview of Recent Progress in Lightning Research and Lightning Protection [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 428-442.
- [4] Gomes C, Diego A G. Lightning protection scenarios of communication tower sites; human hazards and equipment damage [J]. Safety Science, 2011, 49(10): 1355-1364.
- [5] Civil A. The effects of lightning discharges on control & communication cables and antenna systems; proceedings of the 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference [C]. 2016: 588-593.
- [6] Sunahara Y, Matsunaga M, Mano S, et al. Microstrip antenna [Z]. US. 1991.
- [7] Pozar D M. Microstrip antennas [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(1): 79-91.
- [8] Howell J. Microstrip antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1975, 23(1): 90-93.
- [9] Munson R. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays [J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions on, 1974, 22(1): 74-78.
- [10] Chlavin A. A new antenna feed having equal E- and H-plane patterns [J]. Antennas & Propagation Transactions of the Ire Professional Group on, 1954, 2(3): 113-119.
- [11] Clavin A, Huebner D, Kilburg F. An improved element for use in array antennas [J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions on, 1974, 22(4): 521-526.
- [12] King R W P, Owyang G H. The Slot Antenna with

- Coupled Dipoles [J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1960, 8(2): 136–143.
- [13] Luk K M, Wong H. A new wideband unidirectional antenna element [J]. Int J Microwave Opt Technol, 2006, 1(1): 35–44.
- [14] Wu B Q, Luk K M. A Broadband Dual-Polarized Magneto-Electric Dipole Antenna With Simple Feeds [J]. Ieee Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 60–63.
- [15] Liang W L, Jiao Y C, Li J W, et al. Circularly polarised magneto-electric dipole antenna [J]. Electronics Letters, 2014, 50(14): 976–978.
- [16] Sun X N, Wang Q G, Zhou X, et al. Response Characteristics of Dipole Antenna Exposed to Nuclear Electromagnetic Pulse [J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(6): 50–54.
- [17] Sebastiani S. Protecting VHF antennas from EMP [C]. proceedings of the IEEE 1991 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1991: 297–303.
- [18] Podgorski A S, Podgorski E M. Lightning and Nemp Protection of HF and VHF Antennas-Numerical Simulation [C]. proceedings of the INTELEC '86-International Telecommunications Energy Conference, 1986: 433–436.

Research on Lightning Protection Antenna Design and Lightning Protection Performance for 5G Communication Base Station

GUO Ming¹, LIU Kun¹, DU Yuming¹, SUN Xiaofeng¹, DONG Zhicheng²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. College of Information Science and Technology, Xizang University, Lasa 850000, China)

Abstract: Lightning electromagnetic pulse (LEMP) is a strong electromagnetic pulse that radiates outward during natural lightning discharge. In recent years, most of the lightning attacks on the communication base station have directly struck the tower of the communication base station, but the damage to the back end of the communication base station is more caused by the lightning electromagnetic pulse released with lightning. The antenna is a device that transmits and receives electromagnetic waves. The lightning electromagnetic pulse energy released when lightning strikes the tower is easy to damages the back-end equipment through the coupling of the antenna. Therefore, a lightning-proof antenna applied to a 5G band is designed in this paper based on reconfigurable technology. To explore the coupling effect of the designed antenna near the lightning channel and analyze its suppression effect on the lightning electromagnetic pulse in the protective state, this paper based on the lightning return model and Heidler lightning current function model, combined with the simple single tube tower model, established the lightning channel-tower-antenna model and studied the coupling effect of antennas with different polarization modes on the lightning electromagnetic pulse. The influence of different feeding directions of the designed antenna on the suppression of lightning electromagnetic pulse energy is discussed and analyzed. Through the analysis of the above problems, the following conclusions are drawn: the antenna has a good shielding performance for the lightning electromagnetic pulse when it works in the online polarization state. The calculation results show that the coupling energy of the antenna to the lightning electromagnetic pulse is mainly distributed in the early stage of the lightning current development, but the coupling voltage at the rear end of the antenna is very small in the late stage, which indicates that the energy of the low-frequency energy-coupled antenna is much less than that of the high frequency antenna.

Keywords: lightning electromagnetic pulse; 5G antenna; polarization reconfigurable; lightning protection antenna