

文章编号: 2096-1618(2022)03-0270-06

# 闪电对 n79 频段 5G 微带天线的电磁耦合效应研究

倪鹏程<sup>1</sup>, 刘 昆<sup>1</sup>, 杜雨谔<sup>1</sup>, 孙筱枫<sup>1</sup>, 董志诚<sup>2</sup>

(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:** 基于团队前期研究, 建立天线在闪电通道附近的电磁耦合模型, 详细分析所设计的 n79 频段(4.8~4.9 GHz)微带天线在不同极化状态下与闪电之间的电磁耦合特征。结果表明: 天线为垂直极化状态时, 其电场与闪电通道附近电场极化匹配, 天线后端感应电压峰值便会大于同一时刻下的圆极化状态下的感应电压峰值。天线在不同极化状态下与闪电通道的耦合电压与其极化偏转角度有关, 当天线表面电流的主要方向与闪电通道电场极化方向平行时, 天线后端感应电压达到最大, 而当天线表面电流的主要方向与闪电通道垂直时, 天线后端的感应峰值电压最小。并提出一种基于天线极化可重构的防雷新方法。

**关键词:** 雷击电磁脉冲; 5G; 微带天线; 极化可重构天线; 雷电耦合效应

**中图分类号:** TN821

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcui.2022.03.006

## 0 引言

雷电对电子设备造成的危害和带来的损失引起大家的广泛关注。经过不断完善理论体系以及具体的实践探索, 可以将雷电防护的主要手段分成两种, 一种是建筑物外部的雷电防护, 另一种则是建筑物内部电气设备的相关雷电防护。主要的防护手段有使用避雷针、引下线、接地装置、电压短路装置、浪涌保护器(SPD)、电路滤波器<sup>[1]</sup>等。接地体在整个防护体系中具有重要的作用, 它能将雷击的巨大能量导入地面, 避免产生更多危害。目前, 随着现代通信技术的快速发展, 以微带天线技术为主要代表的 5G 天线技术正在引领天线技术的研究热潮。现在的建筑物中都分布有大量的电子设备, 闪电电磁脉冲(LEMP)携带有巨大的能量, 这些能量对建筑物中的相关电子设备会造成严重的危害, 而对闪电电磁能量与天线耦合效应的研究相对较少, 这严重制约了相关行业的发展。

当前已有的电磁辐射对天线影响的研究中, 大部分集中于天线对高空和电磁脉冲<sup>[2]</sup>或者核电磁脉冲在 HF 或 VHF 范围内的耦合效应<sup>[3-4]</sup>, 对基站通信天线在雷电电磁脉冲中的研究相对较少。张其林等<sup>[5]</sup>讨论了分形闪电通道附近的电磁场特征, 根据其所建立的时域闪电模拟模型得出如下结果: 在近距离内, 方位角对电磁场有十分关键的影响, 而随着距离的增加影响逐渐减弱, 弯曲闪电通道对电场的影响与方位角密切相关, 通道的弯曲程度一定要纳入闪电通道整体电磁模型的计算中。Zhang 等<sup>[6]</sup>模拟了闪电回击模型

和回击的物理模型, 并以此研究闪电通道电磁场时间与空间的特征分布; 以闪电回击点为中心, 附近 100 m 范围内的电磁场特征, 发现电场的分布主要特征表现为柱形与球形, 而磁场分量的分布更类似于圆柱体。Liu 等<sup>[7]</sup>通过建立雷击铁塔通道模型, 讨论了 900 MHz 偶极子天线在闪电通道附近对雷电电磁脉冲的耦合效应。文献[8]提出一种无线基站增强型防雷系统, 在 SSPS 的基础上进一步减少了从接地环流向基站内部设备的雷电流。文献[9-10]分析表明闪电直击金属塔上天线的概率很低, 但是在铁塔与铁塔隔离的系统产生侧闪或者弧光放电的概率很高, 且天线对雷电电磁脉冲的耦合电压会对天线后端的弱电电路带来较大的危害。彭涛<sup>[11]</sup>提出一种在 L 频段具有防雷功能的对称振子天线, 利用矩量法作为天线特征分析的方法, 将高频和低频能量进行拆分, 通过抑制天线高频部分的能量, 使用特殊的馈电方式, 最终达到雷电防护的目的。Wang 等<sup>[12]</sup>利用圆极化天线在低频拥有较少法拉第效应的特性, 设计了一种具有防雷功能的高功率宽波束圆极化天线, 在底座的接地平面中心处安装直径为 20 mm 的金属避雷针用于防雷, 通过使用功率分配器取代 1/4 波长阻抗变换器, 在一定程度上减少了所需馈电网络的尺寸。此外, 使用相同宽度的带状线, 使电路与避雷针保持了良好的距离, 减小了闪电损毁设备的概率。文献[13]为提高雷电探测系统的性能, 所设计的系统包含两种类型的天线: 环形天线与电容天线, 且在平行板天线之间增加铜片层, 以此来探测相关闪电电磁脉冲数据, 对比多叠片电容天线与单片电容天线, 发现天线的性能随着叠片数量的增加而增加。Morales Rodriguez<sup>[14]</sup>提出一种慢速天线, 建立的闪电预

警系统可以成功检测云内闪和云地闪,也可以用来预测云对地闪电发生的概率。

上述文献对闪电相关电磁场特征及各类通信相关设备在闪电电磁脉冲环境下的雷击耦合效应进行了研究,且根据文献[7]的研究结果,天线距离铁塔顶端越近,天线后端感应电压越大,通过天线耦合的闪电电磁能量对后端弱电设备有着巨大威胁。本文根据中国通信基站天线的特点,设计一种工作在 n79 频段(4.8 ~ 4.9 GHz),可实现线-圆极化重构的微带天线单元,分析其处于线极化与圆极化两种工作状态下对雷电电磁脉冲的耦合效应,并提出一种基于天线极化可重构的防雷新方法。

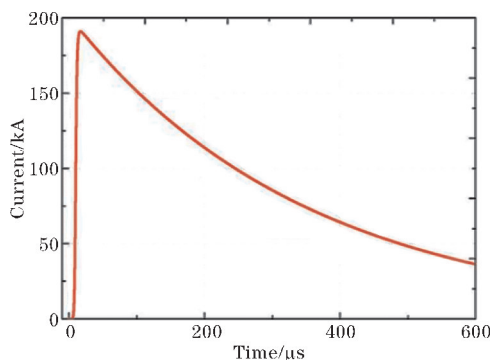
## 1 仿真模型

### 1.1 闪电回击模型

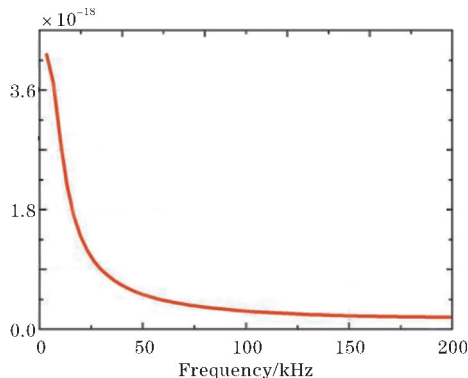
基于文献[7]建立闪电通道回击模型,模型为装有避雷针的10 m基站铁塔,雷电电流波形选择 Heidler 函数<sup>[15]</sup>,为

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

式中: $I_0$  为峰值电流; $\eta$  为峰值电流修正系数; $n$  为电流陡度因子,通常取 10; $\tau_1$  是决定电流上升(波头)的时间常数; $\tau_2$  是决定电流下降(波尾)的时间常数,首次及继后回击波形参数设置跟文献[8]一致。首次与继后回击的电流波形及频谱波形如图 1、2 所示。

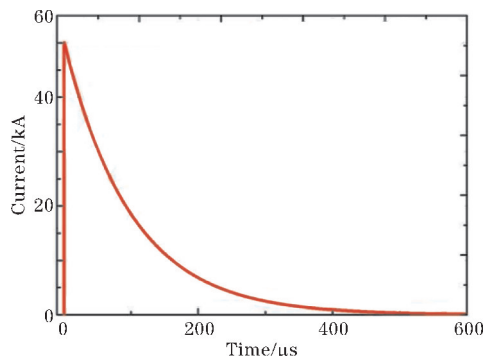


(a) 电流时域波形

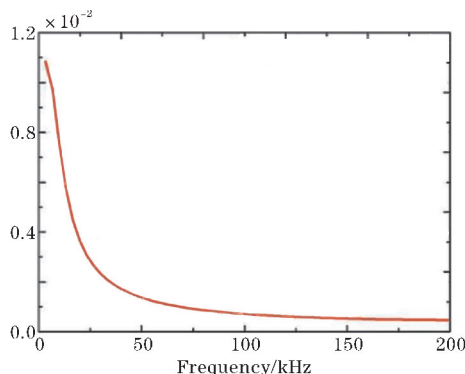


(b) 电流频谱波形

图1 首次回击函数模型



(a) 电流时域波形



(b) 电流频谱波形

图2 继后回击函数模型

图3为首次回击和继后回击电流的归一化频谱图,由图中放大区域可以看出,继后回击比首次回击拥有更多的高频分量。

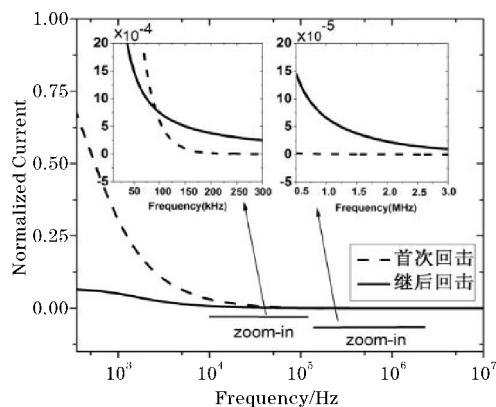


图3 首次和继后回击电流归一化频谱图

### 1.2 极化可重构天线

本文所设计的极化可重构天线为微带天线,天线结构如图4所示,介质基板介质基板选用 Rogers 5880,  $W$  和  $L$  分别为介质基板的宽度与长度,  $W_1$  和  $L_1$  则是矩形微带贴片的宽度与长度,  $P_1$  与  $P_2$  代表边长为 2 mm 的方形调谐枝节,  $D_1$  与  $D_2$  则是 PIN 二极管;短路线的长度  $S_1$ 、 $S_2$  是天线在谐振频点处的波长,  $V_1$ 、 $V_2$  为对应的接地导体,相关参数值见表 1。采用的

PIN 二极管型号为英飞凌 BAR50-02V 型二极管,工作频率为10 MHz ~6 GHz,且具有低正向电阻、低谐波失真和1 GHz左右的低电容等特点,特别适用于移动通信中的天线开关<sup>[16]</sup>。在导通时该二极管等效为一个1.2 Ω的电阻与0.6 nH的电感串联。而当其截止时,可以将其等效成一个5 kΩ电阻与0.15 pF电容相并联,再与一个0.6 nH电感相串联的电路,如图5所示。

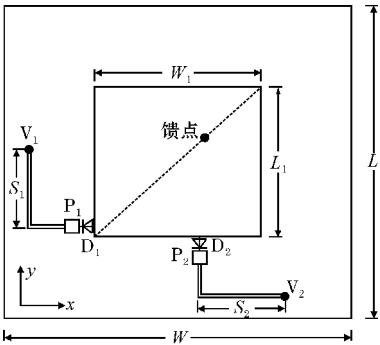


图4 天线结构

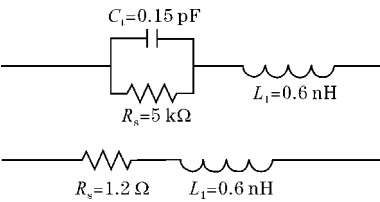
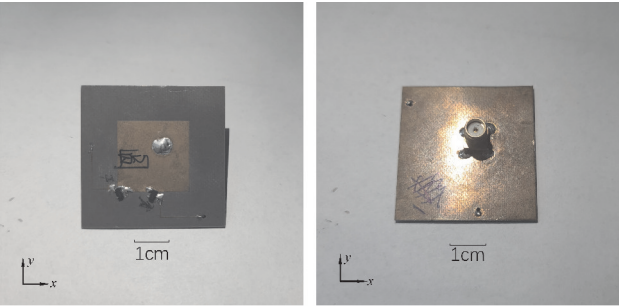


图5 PIN 二极管等效电路

表 1 天线基本参数

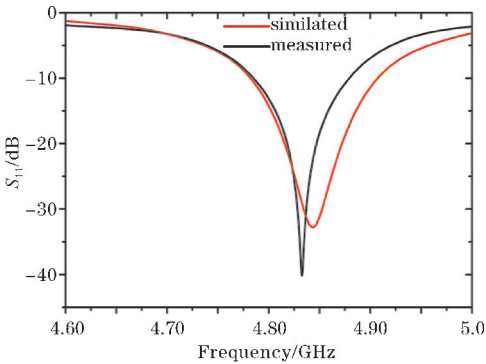
单位:mm					
$W$	$L$	$W_1$	$L_1$	$S_1$	$S_2$
38.8	38.12	19.4	19.06	15.45	15.45

天线加工图如图6所示,当PIN二极管 $D_1$ 截止, $D_2$ 导通时,天线的极化右旋圆极化,回波损耗 $S_{11}$ 、E面及H面的仿真和暗室测试结果如图7所示。实测 $S_{11}$ 谐振频点为4.856 GHz,工作带宽为110 MHz,完全覆盖移动n79频段(4.8 ~4.9 GHz)。当PIN二极管 $D_1$ , $D_2$ 都为截止状态时,天线处于线极化状态,回波损耗 $S_{11}$ 、E面及H面的仿真和暗室测试结果如图8所示。

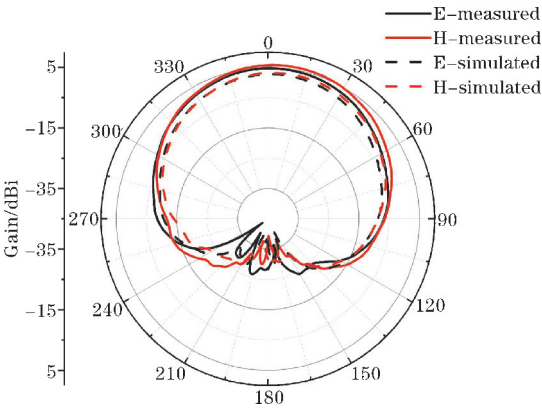


(a)正面 (b)背面

图6 天线加工图

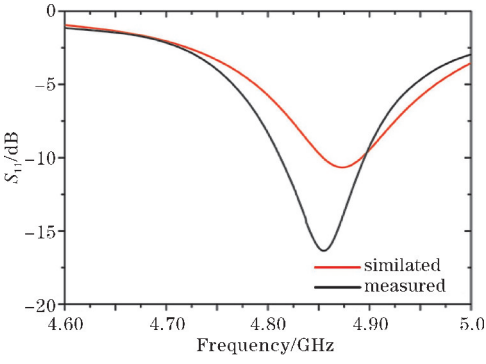


(a)  $S_{11}$

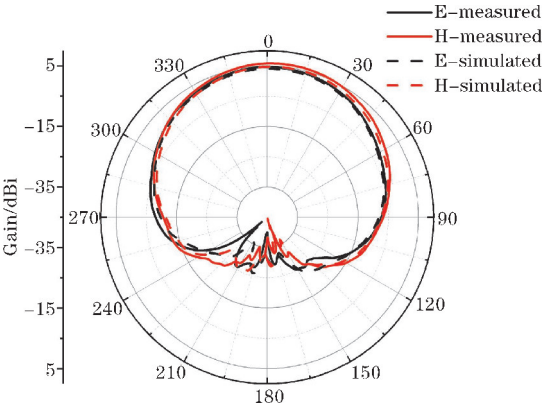


(b)方向图

图7 天线右旋圆极化 $S_{11}$ 和方向图的仿真与测试结果



(a)  $S_{11}$



(b)方向图

图8 天线线极化 $S_{11}$ 和方向图的仿真与测试结果

2 闪电回击对天线的耦合效应

根据文献[7]建立天线在闪电通道附近的耦合模型,分析天线分别在首次和继后回击下天线距离地面不同高度以及天线不同旋转角度的耦合效应。

2.1 不同高度下回击对天线的耦合效应

选取4个采样点,分别距离地面9 m,7 m,5 m,3 m,且每个采样点与铁塔的水平距离都为0.5 m。讨论所设计的天线在线极化(LP)与右旋圆极化(RHCP)状态下的耦合效应,且此处线极化为垂直极化。表2为各位置的电压峰值。图9为首次回击和继后回击下不同高度天线分别处于垂直极化和右旋圆极化状态下后端的耦合电压曲线。图10和图11分别为首次回击

与继后回击下天线位于不同高度时后端感应电压的峰值拟合曲线。可以看出,在相同位置下,继后回击天线后端的感应电压比首次回击的感应电压更大。圆极化能够在雷击情况下降低天线后端对闪电电磁能量的耦合,且在距离天线顶端5 m范围内,天线的感应电压随高度的降低变化得更快。

表2 感应电压峰值

距离地面高度/m	电压/V			
	首次回击		继后回击	
	LP	RHCP	LP	RHCP
9	13.25	7.32	219.54	103.27
7	4.96	2.67	69.6	28.83
5	3.82	2.07	23.64	12.17
3	1.04	0.82	12.27	9.38

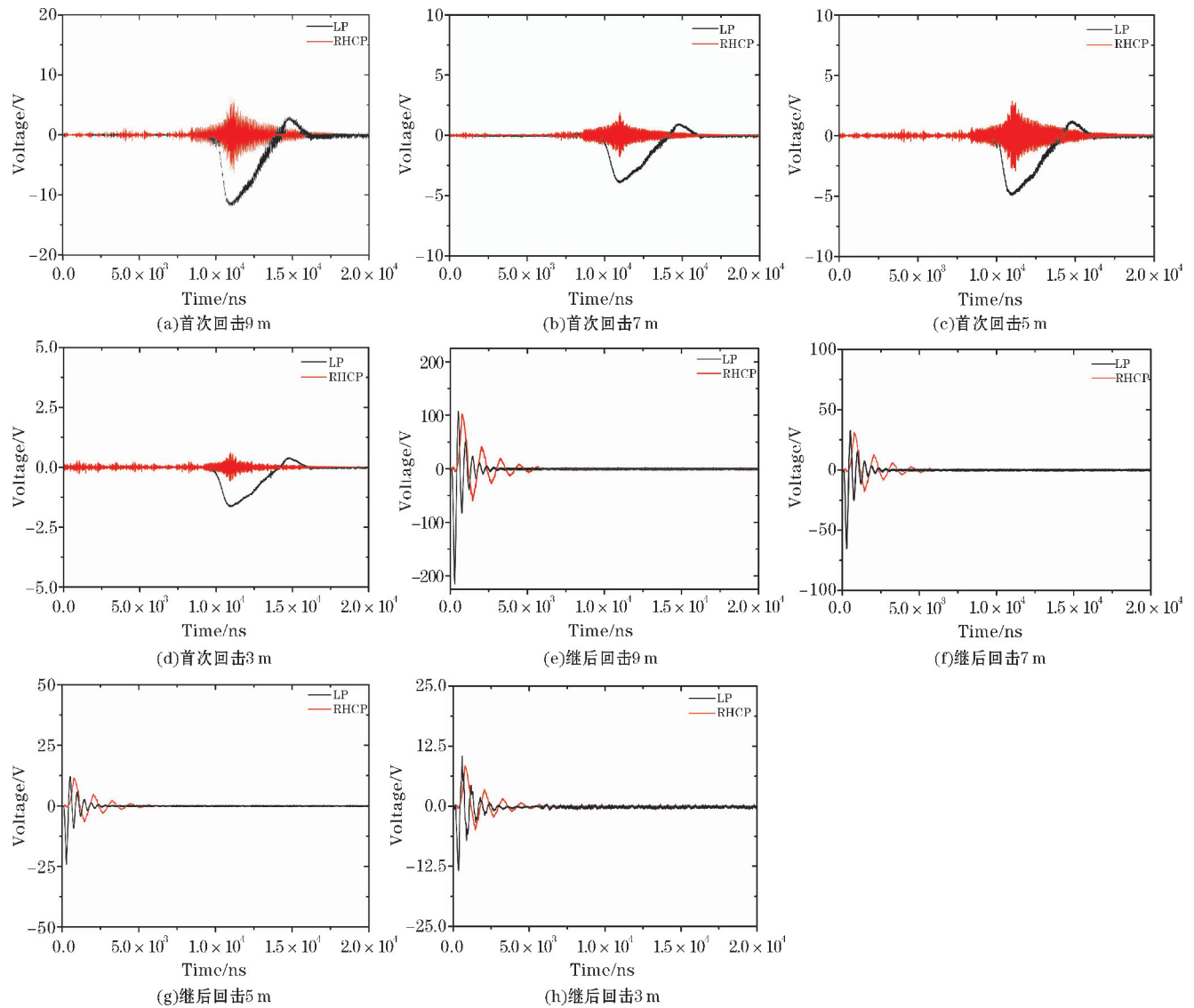


图9 首次与继后回击下不同高度天线的耦合电压



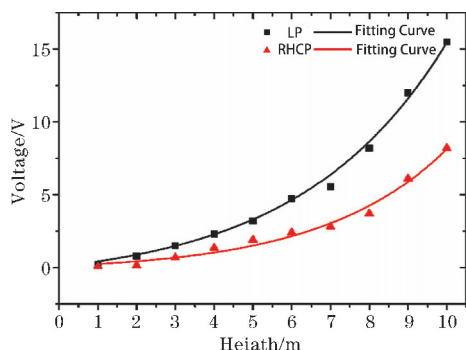


图10 首次回击下不同高度天线的耦合电压峰值

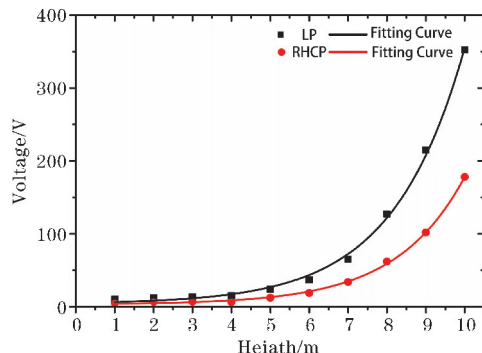


图11 继后回击下不同高度天线的耦合电压峰值

## 2.2 不同旋转角度回击对天线的耦合效应

本文所设计天线圆极化与极化在主辐射方向上的电场强度相同,圆极化状态电场的垂直分量小于线极化的垂直电场。由于圆极化状态下相同高度的天线后端感应电压小于垂直极化状态下的感应电压,猜想圆极化的水平电场分量与闪电的电场由于极化失配使得天线在圆极化状态下的后端感应电压小于垂直极化状态下的感应电压。基于此选取距离铁塔0.5 m,分别距离地面10 m,9 m,8 m,7 m,6 m的5个采样点,分析线极化状态下天线在不同旋转角度下对闪电电磁能量的耦合效应,旋转角度 $\theta$ 由 $-\pi$ 到 $\pi$ 每间隔 $\pi/4$ 计算一次。主要分析比较线极化状态天线旋转角度为0(垂直极化)与 $\pi/2$ (水平极化)时天线后端的感应电压。图12为线极化状态下不同旋转角度的天线后端感应电压峰值曲线图。由图12可知,当线极化状态下的天线随着先转 $90^\circ$ ( $-\pi/2$ 和 $-\pi/2$ )时,天线由垂直极化状态变为水平极化状态,天线后端的耦合电压由352.2 V降至10.2 V,仅为垂直极化状态下的2.9%。此时天线极化方式与雷电电磁场极化方式失配,天线后端97.1%的能量被抑制。此计算结果验证了猜想圆极化状态下天线后端的感应电压小于垂直极化状态下的感应电压是由于圆极化的水平电场分量与闪电的电场失配的结果。根据计算结果可以设计一种使天线在闪电电磁脉冲环境下的极化状态转为水平极化的天

线,减少通过天线耦合的闪电电磁能量对后端弱电设备带来的损害,目前可用极化可重构的方法来实现此效果,所以提出基于天线极化可重构的防雷新方法。

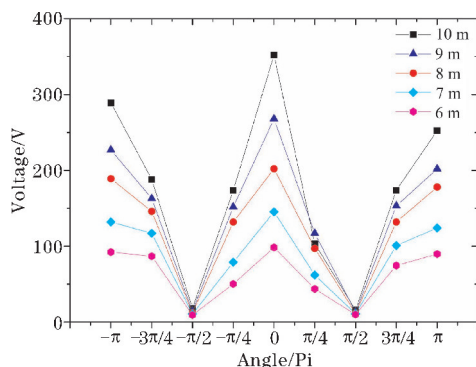


图12 不同极化旋转角度下线极化天线采样点处感应电压峰值分布趋势图

## 3 结论

分析了n79频段微带天线在不同回击情况下天线对雷电的耦合效应,且针对天线不同旋转角度对天线雷电电磁能量耦合效应的影响进行分析讨论,得出以下结论:

(1)即便首次回击的雷电电流和电压都高于继后回击,但是继后回击在高频部分所拥有的能量却远大于首次回击,所以天线在继后回击情况下耦合的闪电电磁能量比首次回击情况下更多,所以继后回击更易通过天线对后端的弱电设备产生威胁。

(2)当天线处于水平极化状态时,天线极化方式与雷电电磁能量失配,从而能够有效抑制天线后端的感应电压。所以提出一种基于天线极化可重构的防雷新方法,使天线转变为水平极化的方式,使天线与雷电电磁场极化失配,从而更好地保护后端的弱电设备。

## 参考文献:

- [1] 刘元林. 移动通信基站遭受雷击时的空间电磁分布及影响[J]. 硅谷, 2010(3): 8-9.
- [2] 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): 51-54.
- [3] S Sebastiani. Protecting VHF antennas from EMP[C]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 1991: 297-303.
- [4] Podgorski A S, Podgorski E M. Lightning and Nemp Protection of HF and VHF Antennas - Numerical

- Simulation [ C ]. International Telecommunications Energy Conference. IEEE, 1986:433-436.
- [5] 张其林,冯建伟,赵中阔,等.分形闪电通道模型的建立及其电磁辐射特征[J].大气科学学报,2010,33(6):719-724.
- [6] Zhang Z, Tian Y, Wang C, et al. Research on the Distribution Characteristics of Electromagnetic Environment in the Lightning Return Stroke Near-Field Area [ C ]. International Symposium on Antennas and Propagation. IEEE, 2019:1-4.
- [7] Liu K, Li S W, Qie X S, et al. Analysis and Investigation on Lightning Electromagnetic Coupling Effects of a Dipole Antenna for a Wireless Base Station [ J ]. IEEE Transactions on Electromagn Compatibility, 2018, 60(6):1842-1849.
- [8] Tsuge R, Baba Y, Kudo T. Development of Enhanced Lightning Protection System for a Wireless Base Station and its Performance Evaluation Using the FDTD Method [ J ]. IEEE T Electr Electr, 2020, 15(11):1622-1629.
- [9] Gomes C, Diego A G. Lightning protection scenarios of communication tower sites; human hazards and equipment damage [ J ]. Safety Sci, 2011, 49(10):1355-1364.
- [10] A Civil. The effects of lightning discharges on control & communication cables and antenna systems [ C ]. International Power Modulator and High Voltage Conference. IEEE, 2016:588-593.
- [11] 彭涛.一种具有防雷保护功能的对称振子天线设计[J].科技创新与应用,2017(2):95-96.
- [12] B Wang, S W Cheung, W Wang, et al. A high-power wide beamwidth circularly polarized antenna with lightning protection [ C ]. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2017:1933-1935.
- [13] J Y Ong. Performance Analysis of Stacked Capacitive Antenna for Lightning Remote Sensing [ C ]. International Conference on Electrical Engineering and Computer Science. IEEE, 2018:305-308.
- [14] C A Morales Rodriguez. Lightning warning system based on a slow antenna [ C ]. International Symposium on Lightning Protection. IEEE, 2015:153-156.
- [15] Heidler F. Traveling current source model for LEMP calculation [ C ]. proc. 6th Int. zurich symp. Electromagn compat, 1985:157-162.
- [16] Ge L, Luk K M. A Band-Reconfigurable Antenna Based on Directed Dipole [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(1):64-71.

## Investigation at Lightning Electromagnetic Coupling Effects of 5G Microstrip Antenna Working on n79 Band

NI Pengcheng<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>, DU Yuming<sup>1</sup>, SUN Xiaofeng<sup>1</sup>, DONG Zhicheng<sup>2</sup>

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

**Abstract:** In this paper, based on the lightning return stroke electromagnetic model, the lightning channel-communication tower-antenna model is established. The electromagnetic coupling characteristics between the n79 band (4.8-4.9 GHz) microstrip antenna designed in this paper and lightning in different polarization states are analyzed in detail. When the antenna is in linear polarization state, the polarization state of its electric field matches that of the electric field near the lightning channel, the peak value of the coupling voltage at the back end of the antenna will be greater than the peak value of the coupling voltage in the circular polarization state at the same time. The coupling voltage of the antenna with the lightning channel in different polarization states is related to its polarization deflection angle, when the main direction of the current on the antenna surface is parallel to the lightning channel, the induced voltage at the back end of the antenna reaches the maximum. When the main direction of the surface current of the antenna is perpendicular to the lightning channel, the induced peak voltage at the back end of the antenna is the smallest. Based on this, a new method of lightning protection based on antenna polarization reconfigurable is proposed.

**Keywords:** LEMP; 5G; microstrip antenna; polarized reconfigurable antenna; lightning coupling effect