

文章编号: 2096-1618(2021)04-0355-06

# 首次和继后回击对 GSM 频段微带天线 雷电电磁耦合效应的影响研究

王元<sup>1</sup>, 刘昆<sup>1</sup>, 杜雨洛<sup>1</sup>, 孙筱枫<sup>1</sup>, 杜春伶<sup>1</sup>, 陈极权<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:**为研究基站通信塔遭受雷击时,通信塔上 890 ~ 954 MHz 频段微带天线在不同雷击下的雷电电磁耦合效应,基于闪电回击电磁模型,建立闪电通道-通信铁塔-大地模型及天线模型,研究首次回击和继后回击对 890 ~ 954 MHz 频段微带天线雷击耦合效应的影响。结果表明:虽然首次回击的总能量远远大于继后回击,但继后回击比首次回击携带更多的高频能量,对于安装在通信塔上、同时可能处于闪电通道附近的 890 ~ 954 MHz 频段的微带天线而言,继后回击对其雷电耦合效应的影响更大,继后回击耦合入微带天线的能量远远大于首次回击。

**关键词:**微带天线;雷电耦合效应;首次回击;继后回击

**中图分类号:**TN822+.4

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.001

## 0 引言

闪电电磁脉冲 (LEMP) 是一种功率很高的辐射源,很容易通过导体、电缆、天线和金属等馈入通信系统内部,从而对电子电气设备造成干扰和损坏。随着电子设备的敏感度和集成度增大,LEMP 受到越来越多的研究和关注,在已有的研究中,有大量对 LEMP 的传播特性、计算方法及耦合特性进行了研究,但对于基站天线耦合闪电电磁脉冲的研究较少。基站天线一般都安装在通信铁塔较高的位置,位于局部区域制高点,雷电直接击中天线的概率很低,但铁塔容易被雷电击中,当铁塔遭受雷击时,雷电流流向大地<sup>[1]</sup>,此时塔体附近会形成强大的电磁场,基站天线将会耦合雷电电磁脉冲,产生几十甚至几百伏的耦合电压,其足以对与天线相连接的电子设备造成干扰甚至形成损坏<sup>[2]</sup>。因此针对 LEMP 对基站天线的耦合特性的研究,对通信电子设备和系统的防护及抗干扰设计具有非常重要的意义。

随着 4G 通信的普及及 5G 的快速发展,基站天线的性能及集成化程度也越来越高,对于天线的防雷设计要求也越来越高。在已有电磁辐射对天线影响的研究中,部分文献集中核电磁脉冲 (NEMP) 对天线的耦合效应<sup>[3-4]</sup>,而雷电电磁脉冲对移动基站通信天线的耦合效应的研究还比较模糊。由于 LEMP 具有和 NEMP 相似的高峰值电磁场和宽频带的特点,因此通

过 NEMP 对天线的耦合影响的研究,对分析 LEMP 对天线的影响具有一定的借鉴意义。Liu 等<sup>[2]</sup>建立了闪电回击-天线模型,从通信塔、天线高度、天线的空间姿态等方面,讨论无线通信基站 900 MHz 偶极子天线的雷电电磁耦合效应,结果表明偶极子天线极易受到 LEMP 的影响,最大可产生上百伏特的电压。Qin 等<sup>[5]</sup>通过 BG 模型中的雷电基底电流数据,并使用 CST 微波工作室建立了机载通信天线与雷击通道的耦合效应分析模型,结果发现,机载通信天线后端的峰值感应电流与峰值感应电压分别为 2 kA 与 10 kV,这足以干扰或损坏接收机。为量化阵列孔对外部电磁环境的敏感性,AnilCivil 等<sup>[6]</sup>研究了雷电放电及其对通信电缆以及天线系统的影响,详细介绍了雷击的机理,研究了雷击产生的电场。并通过仿真和实际测试分别获得电缆和天线上的感应电压。结果表明,雷电放电在电缆和天线上引起的感应电压对其所连接的系统元件可能是危险的。E L Holzman 等<sup>[7]</sup>提出了确定一种阵列天线对雷击产生的电磁辐射的响应的理论和程序,通过分析在阵列上产生的感应电压,从而可以用来确定阵列和其他与阵列间接的电子设备是否受到充分的保护而以防损坏。J Wang 等<sup>[8]</sup>分析了雷击对机载超短波天线的间接影响,通过 CST MICROSTRIPES 对机身上的表面电流密度及机载天线端口中的感应电压和电流进行仿真,并使用仿真结果计算在端口中感应出的功率。结果表明,在最严重的情况下,天线接收器将遭受 66.536 dBmW 的瞬态功率,并且电场强度高达每米一百万伏,足以破坏接收器。D Darwanto 等<sup>[9]</sup>认为雷电

收稿日期: 2021-05-12

基金项目: 四川省重点研发计划资助项目 (2019YFG0104); 四川省科技计划资助项目 (2021YFG0355)

可以被认为是任何敏感电子设备造成的最具破坏性的干扰源,雷电强脉冲电流在与天线连接的电缆上传导,会产生强大的磁场并在设备电路中产生危险的过电压或电流。并且提出了一种新颖的集肤效应接地方法,以减少可能馈入天线同轴线的雷电流。

虽然上述相关文献已对部分天线及相关通信设备雷击耦合效应进行了研究,但针对首次回击和继后回击对当前移动通信基站普遍采用的微带天线单元的耦合效应的影响研究却鲜有涉及。因此,将建立闪电通道-通信塔-大地仿真模型和工作在 890 ~ 954 MHz (该频段为中国移动通信 GSM 使用频率)的微带天线仿真模型。研究首次回击和继后回击的电流频谱及在首次回击和继后回击下,天线处于不同高度时端口耦合电压的时域和频域,从而分析其耦合效应。研究发现,首次回击的总能量远远大于继后回击,但继后回击比首次回击携带更多的高频分量,且继后回击对天线的雷电耦合效应的影响更大,继后回击耦合入微带天线的能量远远大于首次回击耦合的能量。

1 仿真模型

1.1 闪电回击模型

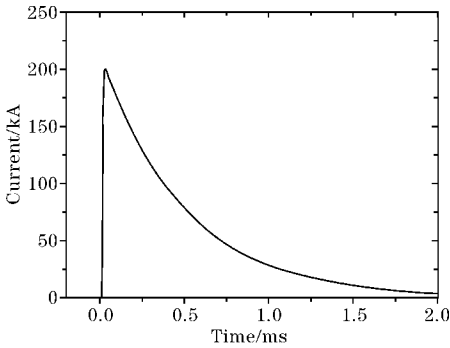
基于天线理论的雷电回击模型,建立闪电通道电压源-通信塔-土壤模型<sup>[2,10-14]</sup>。在该模型中,土壤设置为理想导体(PEC),不考虑土壤的分层结构及相关特性<sup>[15-16]</sup>,通信铁塔简化为长度为30 m的竖直细长圆柱体,不考虑其他复杂几何模型的通信铁塔<sup>[2]</sup>。通信塔顶与闪电回击通道之间设置电压源<sup>[17]</sup>,连接闪电回击通道和铁塔,仿真边界条件设置为开放边界<sup>[2]</sup>。

闪电回击模型所用的雷电基电流为 Heidler<sup>[18]</sup>数学函数模型,如式(1)所示。

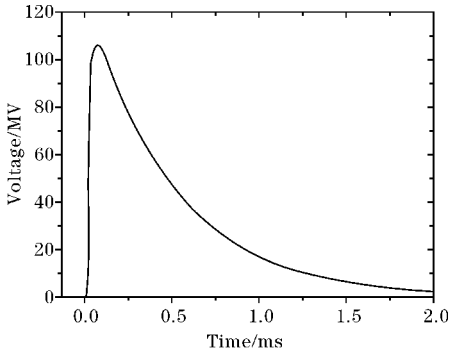
$$i(0,t) = (I_0/\eta) [ (t/\tau_1)^n / (1 + (t/\tau_1)^n) ] \exp(-t/\tau_2) \tag{1}$$

式中  $I_0$  为雷电基电流的峰值;  $\eta$  为峰值电流修正系数;  $n$  为电流变化率因子,通常取 10;  $\tau_1$  为波前时间常数;  $\tau_2$  为波尾时间常数。

首次回击电流波形为 IEC62305 规定的10/350  $\mu$ s 波形,其中  $I_0 = 200$  kA、 $\eta = 0.9$ 、 $\tau_1 = 19$   $\mu$ s、 $\tau_2 = 498$   $\mu$ s。继后回击电流波形为 IEC62305 规定的0.25/100  $\mu$ s 波形,其中  $I_0 = 50$  kA、 $\eta = 0.993$ 、 $\tau_1 = 0.454$   $\mu$ s、 $\tau_2 = 143$   $\mu$ s。首次回击和继后回击模型的电压时域波形及其电流时域波形如图 1、2 所示,首次回击电压波形峰值约为 106.4 MV,继后回击电压波形峰值约为21.6 MV。

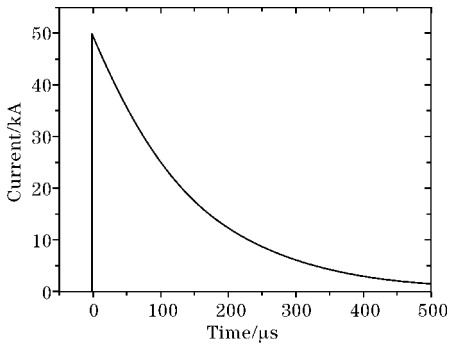


(a) 电压时域波形

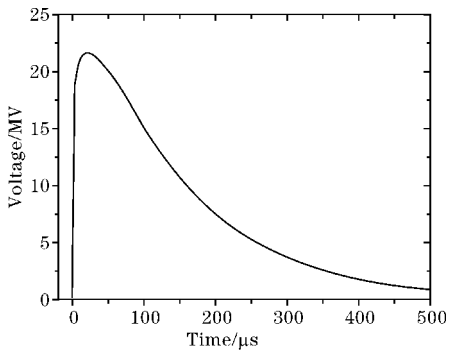


(b) 电流时域波形

图1 首次回击模型



(a) 电压时域波形



(b) 电流时域波形

图2 继后回击模型

将首次和继后回击电流频谱归一化后,如图 3 所示。其中实线为继后回击电流频谱图,虚线为首次回击电流频谱图。从图中可以看出,在频率为 0 ~ 90 kHz时,首次回击的能量要远远高于继后回击,但在

90 kHz后,继后回击的能量开始明显大于首次回击。由此可见,继后回击比首次回击携带更多的高频分量。

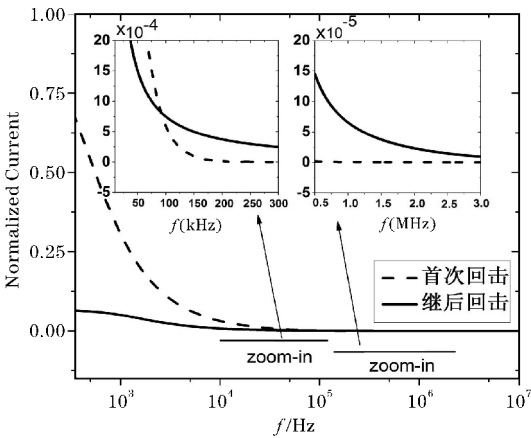


图 3 首次回击和继后回击归一化电流频谱图

1.2 天线模型

建立的天线是贴片偶极子天线,并且使用同轴线馈电,偶极子属于平衡型天线,而同轴线属于不平衡传输线,直接将它们连接在一起,高频电流会流过电缆的外导体,这违反了同轴电缆的传输原理,影响天线的辐射。因此,就要在天线和电缆之间加入平衡不平衡转换器(巴伦)<sup>[19]</sup>,其可以扼制高频电流流入同轴电缆的外导体,因此巴伦的设计在通信系统中具有重要作用。天线结构如图 4 所示,巴伦与同轴电缆的距离为 8 mm。

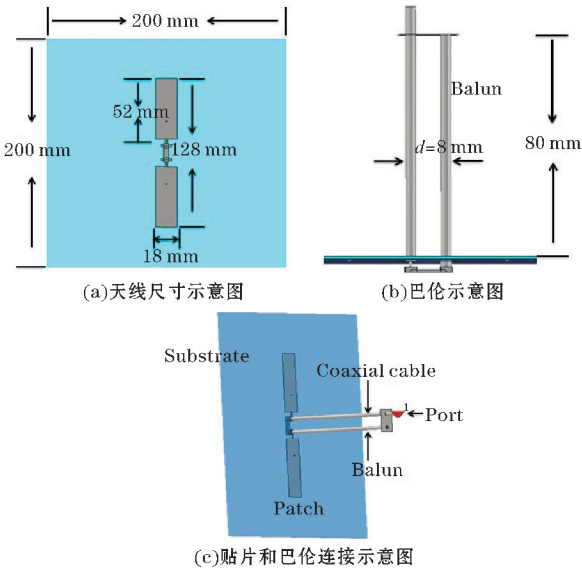


图 4 天线结构示意图

微带天线的  $S_{11}$  与方向图如图 5 所示,由图 5(a) 可以看出微带天线的谐振频率在 900 MHz 附近,并且  $|S_{11}| < -10$  dB 的频率范围为 840 ~ 1014 MHz,完全覆盖移动 GSM 频段(890 ~ 954 MHz)。

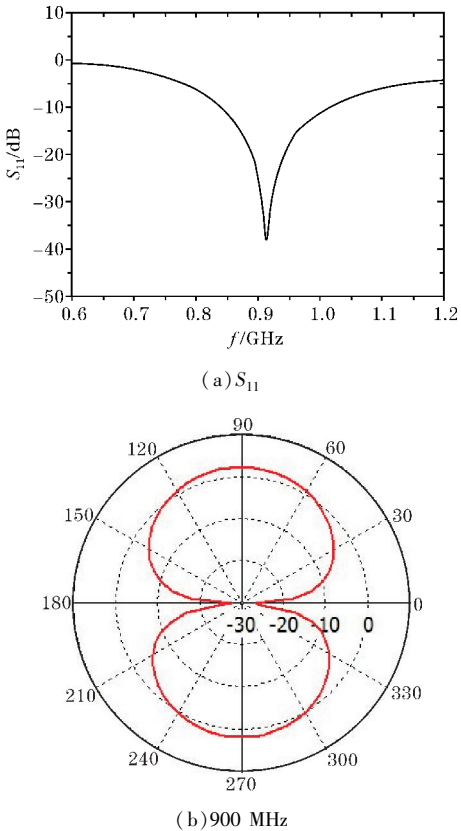


图 5 天线的  $S_{11}$  和 900 MHz 的方向图

2 首次回击和继后回击对天线的耦合效应

依据前述闪电回击模型和天线仿真模型,研究图 4 天线在首次和继后回击情况下的天线端口的耦合电压,分析天线在首次和继后回击下的雷击耦合效应。仿真模型如图 6 所示,天线处于垂直极化状态。在仿真模型中天线分别位于高度 20 m、25 m 与 29 m,距离铁塔 0.75 m 处。

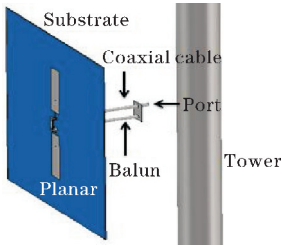


图 6 天线放置姿态示意图

表 1 首次和继后回击下天线端口的耦合电压峰值

距离地面 高度/m	雷电回击波形	
	首次回击/V	继后回击/V
20	9.01	72.27
25	10.02	69.10
29	11.13	65.36

图7分别是20 m、25 m和29 m高度时首次回击和继后回击下,天线端口的电压波形图。首次回击下,天线端口处的电压峰值在20 m、25 m和29 m高度处分别为9.01 V、10.02 V和11.13 V。继后回击下,天线端口处的电压峰值在20 m、25 m和29 m高度处分别为72.27 V、69.10 V和65.36 V。首次回击和继后回击

下,天线在20 m、25 m和29 m高度处耦合电压峰值如表1所示。通过对比首次回击和继后回击下天线的耦合电压可知,继后回击对天线的耦合效应远远大于首次回击,在高度为20 m、25 m和29 m,首次回击下天线的耦合电压与继后回击下天线的耦合电压比值分别为12.47%、14.50%和17.03%。

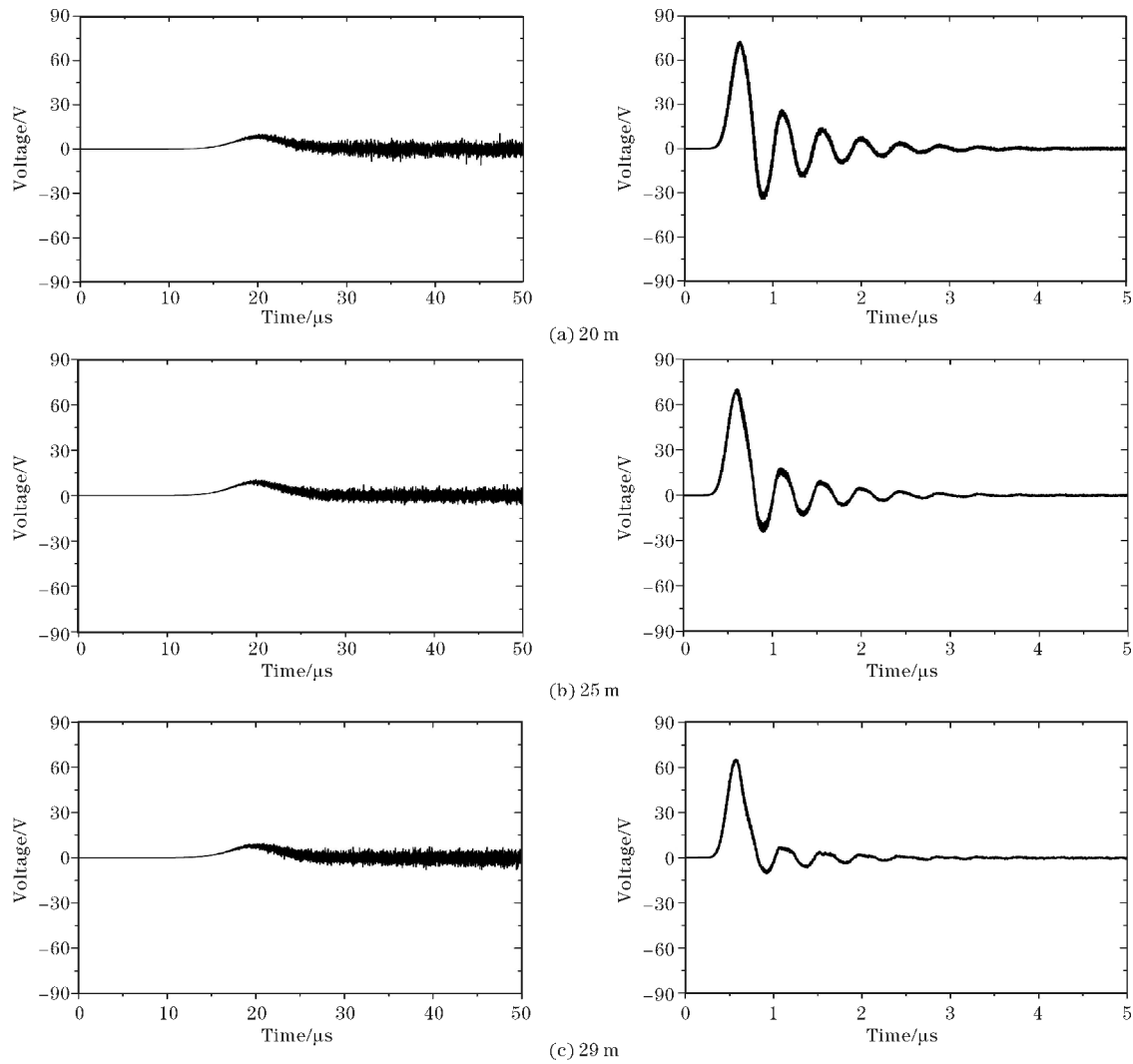


图7 首次回击和继后回击下天线端口的耦合电压波形图

进一步分析首次回击和继后回击下,天线耦合电压的能量分布,在20 m、25 m和29 m处端口耦合电压频谱如图8所示。其中,实线是继后回击下,天线耦合电压频谱,虚线是首次回击下,天线耦合电压频谱。可

以看出,大约在140 kHz以后,继后回击对天线耦合的能量开始明显大于首次回击。而由图3可知,大于90 kHz的频谱范围,继后回击所含能量本就比首次回击高。

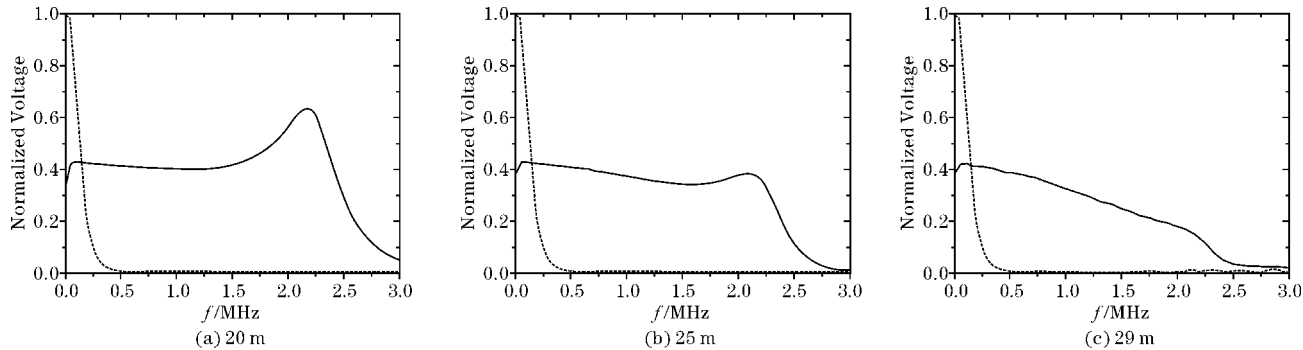


图8 20 m、25 m 和 29 m 耦合电压频谱图



根据对耦合电压的讨论可知,位于铁塔附近,距离地面20 m、25 m和29 m处,继后回击的电磁能量更易于对该天线结构进行耦合,继后回击对所提到的微带天线的雷电耦合效应比首次回击更大。

### 3 结论

针对闪电袭击通信铁塔避雷针,建立闪电通道-铁塔-大地-天线仿真模型,分析讨论首次回击和继后回击的能量分布及其对位于闪电通道附近的890~954 MHz微带天线耦合效应的影响。由上述分析可见:首次回击携带的总能量远远大于继后回击,但继后回击比首次回击携带更多高频能量。对于所述微带天线而言,继后回击的电磁能量更易于对该天线结构进行耦合,继后回击对该天线的耦合效应明显大于首次回击对该天线的耦合效应,因此继后回击对所述结构的微带天线后端设备的威胁也比首次回击更大。

致谢:感谢成都信息工程大学基金项目(KYTZ201816)对本文的资助

### 参考文献:

- [1] Takami J, Okabe S. Observational results of lightning current on transmission towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 547-556.
- [2] Liu K, Li S. Analysis and Investigation on Lightning Electromagnetic Coupling Effects of Dipole Antenna for Wireless Base Station [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(6): 1842-1849.
- [3] Sun X, Wang Q, Zhou X, et al. Response Characteristics of Dipole Antenna Exposed to Nuclear Electromagnetic Pulse [J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(6): 51-54.
- [4] Sebastiani S. Protecting VHF antennas from EMP [C]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 1991: 297-303.
- [5] Qin H. Coupling characteristic study of airborne communication antenna under LEMP effect [C]. International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory. IEEE, 2010: 19-22.
- [6] Ankara A C. The Effects of Lightning Discharges on Control & Communication Cables and Antenna Systems [C]. International Power Modulator and High Voltage Conference. IEEE, 2016: 588-593.
- [7] E L Holzman, A Svitak. Analytical Procedure for Determining the Response of an Antenna Array to an Indirect Lightning Discharge [C]. IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology, 2020.
- [8] J Wang, S Xie, H. Guo. Study of Indirect Lightning Effects on an Airborne Ultra Shortwave Antenna [C]. International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 2012: 724-728.
- [9] D Darwanto, D Hamdani. EMC-based Skin-Effect Grounding for Reliable Lightning Protection System of Antenna System [C]. Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2011.
- [10] Shoory A, Moini R. Analysis of lightning-radiated electromagnetic fields in the vicinity of lossy ground [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 47(1): 315-388.
- [11] Martin A, Uman. The electromagnetic radiation from a finite antenna [J]. Journal of Physics, 1975, 43(1): 33-38.
- [12] Moini R. An antenna theory model for the lightning return stroke [C]. 12th International Zurich Symposium Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, 1997: 149-152.
- [13] Yao C. Finite difference time domain simulation of lightning transient electromagnetic fields on transmission lines [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1239-1246.
- [14] Yao C. Study of magnetic fields from different types of lightning faults on a multi-tower system [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1866-1874.
- [15] Zhang Q, Chen Y, Hou W. Lightning-induced voltages caused by lightning strike to tall Objects considering the effect of frequency dependent soil [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2015, 133: 145-156.
- [16] Zhang Q. 3-D FDTD simulation of the lightning-induced waves on overhead lines considering the vertically stratified ground [J]. IEEE Transactions

- on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57 (5): 1112–1122.
- [17] Moini R, Kordi B. A new lightning return stroke model based on antenna theory [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (4): 29693 – 29702.
- [18] F Heidler. Traveling current source model for LEMP calculation [C]. proc. 6th Int. zurich symp. Electromagn compat, 1985: 157–162.
- [19] 张宁, 俱新德, 任辉. 天线的馈电技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.

## Investigation at the Influence of First and Subsequent Return Stroke to Lightning Electromagnetic Coupling Effects of Microstrip Antenna Working on GSM

WANG Yuan<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>, DU Yuming<sup>1</sup>, SUN Xiaofeng<sup>1</sup>, DU Chunling<sup>1</sup>, CHEN Jiquan, 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:** The lightning electromagnetic coupling effect of the microstrip antenna working on 890–954 MHz is researched under different lightning strokes, when the base station communication tower is struck by lightning. In this paper, based on the lightning return stroke electromagnetic model, the lightning channel-communication tower-ground model and antenna model are established, and the impact of the first and subsequent return strokes to the lightning electromagnetic coupling effect of the microstrip antenna working on 890–954 MHz is studied. It can be found that, although the total energy of the first return stroke is much greater than that of the subsequent return stroke, the subsequent return stroke carry more high-frequency energy than the first return stroke. For the microstrip antenna working on 890–954 MHz, which is installed on communication towers and may be near the lightning channel, as mentioned in this article, its lightning coupling effect will be more affected by subsequent return stroke. The coupling energy of the microstrip antenna from the subsequent return stroke is much greater than that from the first return stroke.

**Keywords:** microstrip antenna; lightning coupling effect; first return stroke; subsequent return stroke