

## 雷电测向正交磁环天线的测角误差校正

胡淼<sup>\*①</sup> 阮泽辉<sup>①</sup> 李鹏<sup>②③</sup> 曹保锋<sup>②③</sup> 周雪芳<sup>①</sup>  
孙佳琦<sup>①</sup> 胡喜明<sup>①</sup> 叶晟<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

<sup>②</sup>(国民核生化灾害防护国家重点实验室 北京 102205)

<sup>③</sup>(防化研究院 北京 102205)

**摘要:** 用于雷电测向的正交磁环天线(OMLA)的测量精度要求不断提高,导致天线自身结构加工误差引起的测角误差(AME)进一步加大。该文对天线自身结构加工误差与测角误差的关系建立理论模型,通过引入补偿系数和等效结构误差角度,提出一种对正交磁环天线测角误差的校正方法。通过实验对比3组正交磁环天线,对其常规测向结果和校正测向结果的测角误差进行对比分析,实验表明校正后测角误差比常规测角误差降低约50%。因此该校正方法在同等硬件条件下,可以很好地提升正交磁环天线的雷电测向精度。

**关键词:** 正交磁环天线; 测角误差; 校正方法

中图分类号: TN82, P457.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)09-2103-05

DOI: 10.11999/JEIT181016

## Measurement Error Correction of the Orthogonal Magnetic Loop Antenna for Lightning-direction Finding

HU Miao<sup>①</sup> RUAN Zehui<sup>①</sup> LI Peng<sup>②③</sup> CAO Baofeng<sup>②③</sup> ZHOU Xuefang<sup>①</sup>  
SUN Jiaqi<sup>①</sup> HU Ximing<sup>①</sup> YE Sheng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

<sup>②</sup>(State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

<sup>③</sup>(Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

**Abstract:** The measurement accuracy for lightning direction finding by the Orthogonal Magnetic Loop Antenna (OMLA) is continuously improved, which results in the Angle Measurement Error (AME) caused by the OMLA machining error increasing. A theoretical model is established for the relationship between the machining error and AME of OMLA. With the compensation coefficient and equivalent non-orthogonal angle error, a AME correction method for OMLA is proposed. The AME of the conventional measurement way and the corrected measurement way are compared through three groups of data experimentally. The experimental results show that the AME by the corrected measurement way is significantly reduced by about 50%. Therefore, this correction method can help the OMLA with the same hardware condition to obtain higher measurement accuracy for lightning direction finding.

**Key words:** Orthogonal Magnetic Loop Antenna (OMLA); Angle Measurement Error (AME); Correction method

### 1 引言

雷电是一种天气现象,发生时大气中出现瞬态

高电流、高电压和强电磁脉冲,辐射电磁波频率从极低频到超高频<sup>[1]</sup>。据气象观测和卫星资料的数据统计<sup>[2]</sup>,全球每秒发生大约2000个雷暴。雷电对人类经济、文化和军事等各个领域的活动都存在着不可忽视的影响。这些影响通常是干扰的、具有破坏性的<sup>[3-5]</sup>。因此及时提供雷电预警,对雷电进行有效定位是保障人员安全、减少雷击灾害损失的重要途径。

世界上许多国家对雷电定位探测技术都展开了研究。雷电定位系统(Lightning Location System,

收稿日期: 2018-11-06; 改回日期: 2019-02-22; 网络出版: 2019-03-18

\*通信作者: 胡淼 miao\_hu@hdu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61705055), 国民核生化灾害防护国家重点实验室开放基金(SKLNBC2015G03)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61705055), The National Key Laboratory of Nuclear and Biochemical Disaster Protection Foundation of China (SKLNBC2015G03)

LLS)普遍应用于航天航空、防灾和电力传输等行业。经过几十年不断的发展与完善,目前LLS的探测精度与效率都有极大的提高<sup>[6-8]</sup>。考虑到LLS是由单站雷电测向设备组网而成的<sup>[9]</sup>,因此提高单站雷电测向设备的测向精度对提升LLS的探测精度有实际的意义。

单站雷电测向设备的核心部件是正交磁环天线(Orthogonal Magnetic Loop Antenna, OMLA)。为提高测向精度,以往对测向角度(测角)误差(Angle Measurement Error, AME)的研究多注重极化场地等外部因素的影响,而正交磁环天线自身A和B两磁环的一致性和夹角误差等因素引起的固有误差则少有人研究<sup>[10]</sup>。随着LLS探测需求的不断提高,用正交磁环天线探测雷电来向的测量精度逐渐达到瓶颈。具体而言,虽然增大磁环面积是提高测向精度简单有效的方法之一,但随着磁环面积的增大,正交磁环天线的A和B磁环的一致性和夹角误差等因素引起的固有误差也会增大。因此研究如何矫正正交磁环天线的固有误差对于提高测量精度,尤其是大面积正交磁环天线有实际的意义。

本文首次分析了单站雷电测向设备测向误差的内在因素,即正交磁环天线自身结构引起的测向误差,建立了等效的误差分析模型,通过本模型提出了相应的矫正方法。

## 2 探测原理及误差

闪电(地闪)的回击特性可以近似于垂直地面的电偶极子,地面看作一个理想导体,因此闪电仅激发横磁波。如图1所示,假设L为垂直地面的地闪通道,A和B磁环分别为垂直夹角的正交磁环天线,轴线OO'与地闪通道L平行。LOO'平面与A、B平面的夹角分别为 $\theta$ 和 $\pi/2 - \theta$ 。根据法拉第电磁感应定律,将A和B磁环上产生的感应电动势峰值相除可求得

$$\theta = \arctan(E_A/E_B) \quad (1)$$

根据式(1)可以得到雷电来向,但因为三角函数的周期性特征,对于由式(1)所计算得到的方位

角 $\theta$ 有 $180^\circ$ 的二义性<sup>[11]</sup>。方位角去模糊技术目前主要有两种:(1)电场天线法,即采用附加一个垂直极化的电场天线判断地闪的极性,进一步确定雷电来向;(2)坡印廷矢量法,即对坡印廷矢量在频域内积分,得到能流密度的表达式,而能流密度方向即雷电来向。因为电磁波不连续,对能流密度进行离散同时分解到东西向环和南北向环方向,得到分解量之后即确定雷电来向<sup>[12]</sup>。

目前常用的正交磁环天线的雷电来向测量精度小于 $1^\circ$ 。此方法测量主要存在有3项误差:极化误差<sup>[13]</sup>、场地误差<sup>[14]</sup>和天线自身结构误差。

极化误差的产生,是由雷电的地闪通道与地平面不完全垂直造成的。在实际情况中,雷电的地闪通道除了主要的垂直方向分量外,还存在较多水平方向分量。现阶段,监测站多使用门控交叉环测向技术解决极化误差问题。即采用宽带接收,对雷电首个电磁脉冲峰值进行采样,来判断雷电来向。因为雷电能量集中的首脉冲放电通常是从地面开始<sup>[15]</sup>,然后沿着导电通道流向雷云,而近地的地闪通道通常是垂直于地面的。若根据雷电首个电磁脉冲峰值判断雷电来向,能够显著地抑制后继雷电水平放电电流分量和分叉闪道引发的测向角度极化误差。

场地误差主要是由于雷电测向设备附近的建筑物、障碍物遮挡或者地面起伏所引起的。当雷电测向设备的安装位置确定时,其所处外部环境不变,因此场地误差也是确定不变的。通过大量的实验数据可以计算该地的误差水平,用于在雷电来向探测场地误差的校正<sup>[13]</sup>。

以下详细讨论天线自身结构误差。

## 3 天线自身结构误差

天线自身结构引起的固有误差可以等效为两种情况:(1)正交磁环天线的A和B磁环的一致性差异,造成这一误差的因素包括磁环面积、绕制工艺和内阻差异等;(2)正交磁环天线的A和B磁环不能实现理想条件的正交,造成这一误差的因素包括磁环天线的夹角不为理想 $90^\circ$ ,磁环面相互扭曲等。

### 3.1 磁环一致性差异误差分析

在实际情况中,正交磁环天线的两磁环存在一致性差异,其影响主要体现在感应电动势峰值的不同。引入补偿系数 $\eta$ 用于弥补两磁环的差异,以达到增强一致性的目的。可以推断,对于一个确定的正交磁环天线,补偿系数是唯一且确定的。定义A、B两磁环在相同条件下响应电动势分别为 $V_1$ 、 $V_2$ ,则补偿系数与响应的关系式为

$$V_1 = \eta V_2 \quad (2)$$

在多个给定的电磁场条件下,测量相同角度

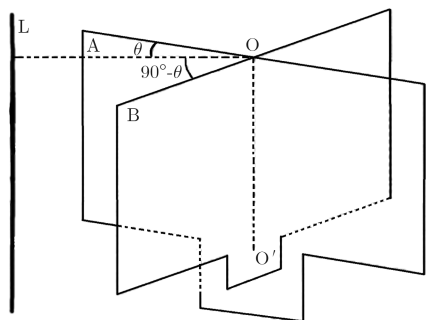


图1 正交磁环天线闪电测向示意图

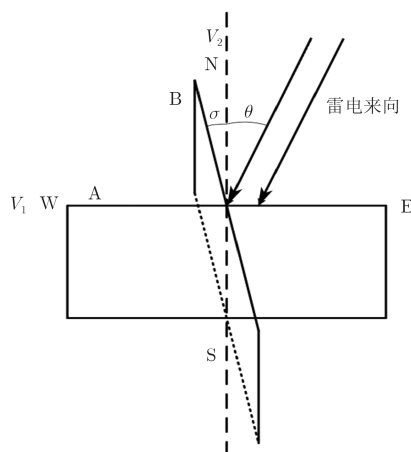
(对于磁环而言)时两磁环的感应电动势, 按点作图后拟合直线, 斜率即所求的补偿系数 $\eta$ 值。

### 3.2 磁环正交误差分析

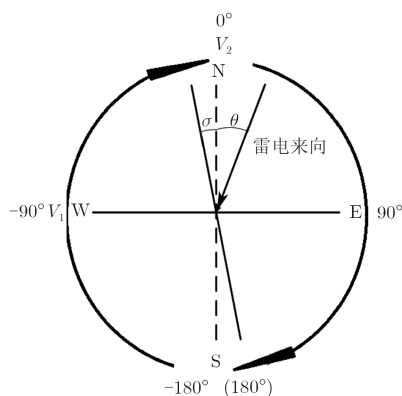
在理论上正交磁环天线需要A和B磁环平面保持理想正交, 而实际情况中磁环由于加工扭曲、夹角不等于 $90^\circ$ 等因素, 使得A, B磁环之间还存在等

效的结构误差角度, 如图2所示。

假设正交磁环天线的A磁环准确东西摆放, 角度自南向北顺时针由 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 递进。定义雷电来向与正南的实际角度为 $\theta$ , 式(1)的计算角度为 $\theta'$ 。根据几何关系, 在磁环理想条件下的感应电动势 $V_2'$ 与实际条件下的感应电动势 $V_2$ 比值为



(a) 立体示意图



(b) 平面示意图

图2 正交磁环天线正交误差示意图

$$\frac{V_2'}{V_2} = \frac{\sin \theta}{\sin \theta \cos \sigma + \cos \theta \sin \sigma} = K(\sigma, \theta) \quad (3)$$

计算角度 $\theta'$ 与实际角度 $\theta$ 的比值为 $k$

$$k = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\arctan[\tan \theta / K(\sigma, \theta)]}{\theta} \quad (4)$$

进一步还可以得实际角度 $\theta$ 关于计算角度 $\theta'$ 与结构误差角度 $\sigma$ 的关系

$$\tan \theta = \frac{\tan \theta' - \sin \sigma}{\cos \sigma} \quad (5)$$

由于三角函数的周期性, 式(5)中 $\theta$ 与 $\theta'$ 的关系在一定区间还需根据结构误差角度 $\sigma$ 值进行 $\pi$ 相位的修正。根据式(5), 通过大量数据的回归分析, 即对计算角度 $\theta'$ 与实际角度 $\theta$ 进行指定函数的曲线拟合, 求解得到等效的结构误差角度 $\sigma$ 值。

以下对结构误差角度 $\sigma$ 进行仿真分析, 假设 $\sigma$ 范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$ , 可以计算 $k$ 值的趋势如图3所示。

由图3可知, 在结构误差角度 $\sigma$ 不为0的前提下, 实际角度 $\theta$ 角在 $0^\circ$ 附近越趋近 $0^\circ$ , 比值 $k$ 的模值越大; 还可以得到结论, 确定的 $\sigma$ 值存在唯一确定的 $k$ 值曲线与之对应。

定义计算角度 $\theta'$ 与实际角度 $\theta$ 之差为测角误差 $\delta$ , 为更直观体现结构误差角度 $\sigma$ 对测角误差 $\delta$ 的影响, 进一步仿真了测角误差 $\delta$ 关于实际角度 $\theta$ 的变化情况, 如图4所示。

由图4可知, 在一定的结构误差角度 $\sigma$ 条件下,

测角误差 $\delta$ 总体存在波浪形的趋势, 测量角度误差 $\delta$ 的最大值近似等于结构误差角度 $\sigma$ 值。

### 4 误差矫正实现分析

以下通过实验实现误差矫正分析, 利用短上升沿脉冲发生器模拟雷电的电磁信号, 信号脉冲的上

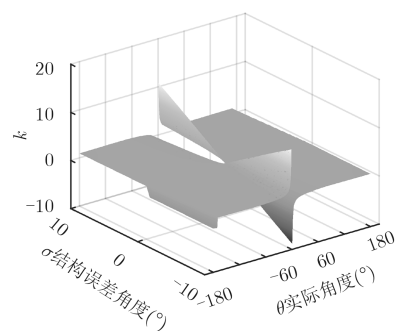


图3  $k$ 值分布趋势图

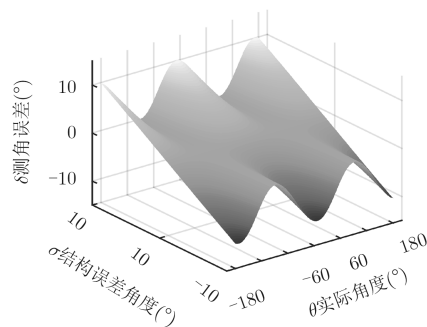


图4 测角误差 $\delta$ 趋势图

升沿为 $0.4\ \mu\text{s}$ , 下降沿为 $10\ \mu\text{s}$ 。设计参数如表1所示的正交磁环天线。

表1 正交磁环天线参数

| 臂长<br>$l\ (\text{mm})$ | 线圈宽度<br>$d\ (\text{mm})$ | 导线直径<br>$\varnothing\ (\text{mm})$ | 匝数<br>$N$ | 环面积<br>$S\ (\text{m}^2)$ |
|------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------|--------------------------|
| 450                    | 4                        | 0.3                                | 50        | 0.2025                   |

#### 4.1 正交磁环天线矫正系数

假定正交磁环天线的A磁环严格指向东西向, 采用如上2.1节所述方法, 当磁环响应分别从 $0\sim 80\ \text{mV}$ 的范围内求得该正交磁环天线的补偿系数 $\eta$ 值为1.097, 补偿系数的测量分析如图5所示。

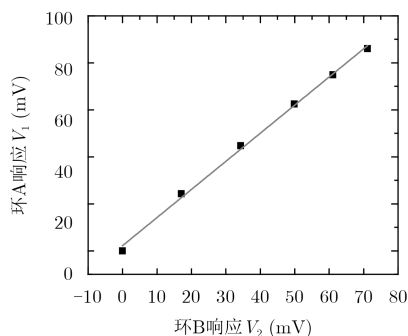


图5 补偿系数测量

获得正交磁环天线的补偿系数 $\eta$ 值1.097之后, 在 $-180^\circ\sim 180^\circ$ 之间间隔 $5^\circ$ 进行响应测量, 即对实

际角度为 $\theta_i$ 的不同来波利用式(1)计算来波角度 $\theta'_i$ , 此处 $i$ 取值为 $-180^\circ\sim 180^\circ$ 。进一步经过回归分析, 对计算角度 $\theta'_i$ 与实际角度 $\theta_i$ 进行函数式(5)的曲线拟合, 计算得到结构误差角度 $\sigma$ 参数值为 $3.43^\circ$ 。此时获得了实验正交磁环天线的补偿系数 $\eta=1.097$ , 结构误差角度 $\sigma=3.43^\circ$ , 这两个参数为该天线的固有矫正参数。

#### 4.2 误差矫正结果分析

对任意来波角度为 $\theta$ 的电磁脉冲信号采用上述正交磁环天线进行来波测向, 采用常规方法(即不采用矫正系数直接测量)计算角度 $\theta'$ 与实际角度 $\theta$ 的测角误差 $\delta$ 的均值为 $1.232^\circ$ , 标准差为 $1.158^\circ$ 。

采用矫正方法即代入补偿系数 $\eta=1.097$ , 结构误差角度 $\sigma$ 将计算角度 $\theta'$ 代入式(5), 求解得到为矫正后来波角度 $\theta''$ , 并进一步求得矫正后的测角误差 $\delta'$ 。矫正后的测角误差 $\delta'$ 相比常规测角误差 $\delta$ 均值从 $1.232^\circ$ 下降到 $0.72^\circ$ , 误差最大值由 $2.876^\circ$ 下降到 $1.805^\circ$ , 标准差由 $1.158^\circ$ 下降到 $0.715^\circ$ 。为了更直观地体现矫正效果, 进行附加的2组对比实验, 3组对比实验的结构误差角度 $\sigma$ 分别为 $3.43^\circ$ ,  $1.85^\circ$ 和 $1.27^\circ$ , 将实验结果的常规测角误差 $\delta$ 和矫正后的测角误差 $\delta'$ 的值取模并按多项式拟合, 曲线如图6所示。实验结果表明, 矫正后测角误差显著降低, 相较常规测角误差均值图6(a)降低了46.9%, 图6(b)降低了54.8%, 图6(c)降低了57.8%。

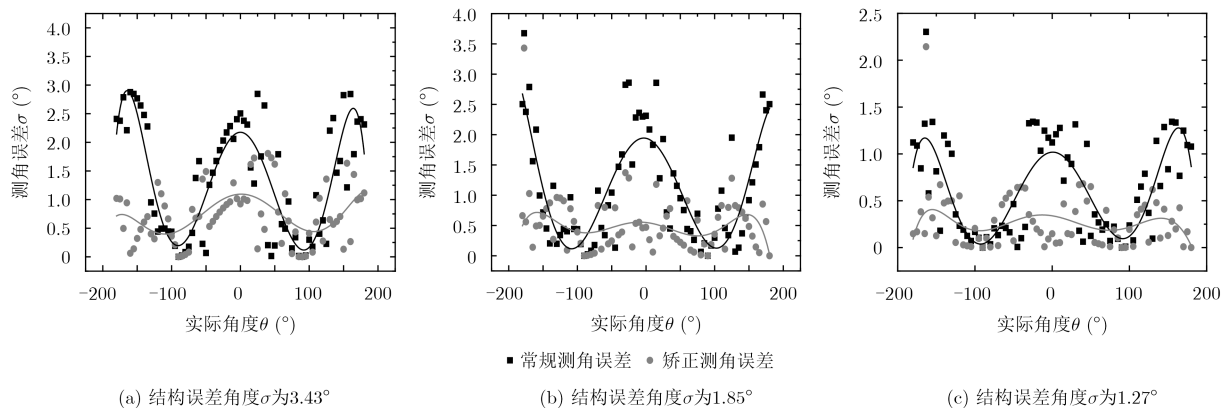


图6 常规测角与矫正测角误差对比

## 5 结束语

本文对正交磁环天线的自身结构加工误差与测角误差之间的关系进行了分析研究。文中建立了等效误差关系模型, 进一步提出了矫正方法并对常规测角误差进行矫正。通过多组实验对比验证矫正效果, 矫正后测角误差降低约50%, 提高了正交磁环天线的测量精度。下一步工作是研究分析正交磁环

天线自身结构误差在LLS中的误差影响, 降低其在系统定位中的误差影响。

## 参考文献

- [1] 李云, 江志东, 刘志田. 雷电单站定位原理与关键技术[J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(3): 17-22. doi: 10.3969/j.issn.1006-009X.2013.03.005.
- LI Yun, JIANG Zhidong, and LIU Zhitian. Principle and

- key technology of single-station lightning location[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2013, 30(3): 17–22. doi: 10.3969/j.issn.1006-009X.2013.03.005.
- [2] 王道洪, 郗秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- WANG Daohong, QIE Xiushu, and GUO Changming. Lightning and Artificial Triggered Lightning[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.
- [3] HABASH R W Y, GROZA V, MCNEILL T, *et al.* Lightning risk analysis of a power microgrid[J]. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2013, 3(1): 107–122. doi: 10.9734/bjast/2014/2466.
- [4] LUO Yi, JIANG Jingzhou, NONG Yu, *et al.* Research on evaluating index of lightning protection safety performance of high voltage overhead transmission line[J]. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, 2(4): 680–686. doi: 10.4236/jpee.2014.24091.
- [5] MÜLLER M M and VACIK H. Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 240/241: 26–34. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.03.020.
- [6] 龚坚刚, 童杭伟. 基于雷电定位系统的浙江电网线路雷击跳闸率评估[J]. 华东电力, 2007, 35(1): 73–75. doi: 10.3969/j.issn.1001-9529.2007.01.021.
- GONG Jiangang and TONG Hangwei. Evaluation of lightning trip-out rates for Zhejiang Power Grid by using lightning location systems[J]. *East China Electric Power*, 2007, 35(1): 73–75. doi: 10.3969/j.issn.1001-9529.2007.01.021.
- [7] 许敏, 宋宁宁, 刘秀娟. 影响雷电定位系统故障查询的原因分析[J]. 山西电力, 2008(4): 29–30. doi: 10.3969/j.issn.1671-0320.2008.04.011.
- XU Min, SONG Ningning, and LIU Xiujuan. Cause analysis of factors affect lightning location system fault inquire[J]. *Shanxi Electric Power*, 2008(4): 29–30. doi: 10.3969/j.issn.1671-0320.2008.04.011.
- [8] LAZZARETTI A E, SANTOS S L F, KÜSTER K K, *et al.* An integrated monitoring system and automatic data analysis to correlate lightning activity and faults on distribution networks[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 153: 6672. doi: 10.1016/j.tifs.2016.10.005.
- [9] 吴璞三. 雷电定位系统[J]. 高电压技术, 1991(4): 1–6. doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.1991.04.001.
- WU Pusan. The lightning location system[J]. *High Voltage Engineering*, 1991(4): 1–6. doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.1991.04.001.
- [10] 赵让元, 潘威炎. 国内外雷电探测研究[J]. 全球定位系统, 1997(4): 1–11. doi: 10.13442/j.gnss.1997.04.001.
- ZHAO Rangyuan and PAN Weiyuan. Domestic and foreign lightning detection research[J]. *GNSS World of China*, 1997(4): 1–11. doi: 10.13442/j.gnss.1997.04.001.
- [11] 刘欣生. 雷电物理及人工引发雷电研究十年进展与展望[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 266–272. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.1999.03.003.
- LIU Xinsheng. Research on lightning physics and artificially triggered lightning over last decade: Progress and prospect[J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(3): 266–272. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.1999.03.003.
- [12] 李贤. 雷电定位系统的优化设计与实现[D]. [硕士学位论文], 北京邮电大学, 2011.
- LI Xian. Optimized design and implement of lightning location system[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [13] LU Tao, CHEN Mingli, DU Yaping, *et al.* A statistical approach for site error correction in lightning location networks with DF/TOA technique and its application results[J]. *Atmospheric Research*, 2017, 184: 103–111. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.10.009.
- [14] 陈明理, 郭昌明, 刘欣生. 交叉环磁天线雷电定位系统场地增益及其求解方法[J]. 中国科学: B辑, 1992, 22(9): 1002–1008. doi: 10.1007/BF02656973.
- CHEN Mingli, GUO Changming, and LIU Xinsheng. Field gain of cross-ring magnetic antenna lightning positioning system and its solving method[J]. *Science China B*, 1992, 22(9): 1002–1008. doi: 10.1007/BF02656973.
- [15] MARSHALL T, BANDARA S, KARUNARATHNE N, *et al.* A study of lightning flash initiation prior to the first initial breakdown pulse[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 217: 10–23. doi: 10.1016/j.atmosres.2018.10.013.
- 胡 淼: 男, 1982年生, 教授, 研究方向为大功率LED技术、激光技术.
- 阮泽辉: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为电磁测量.
- 李 鹏: 男, 1979年生, 副研究员, 研究方向为电磁脉冲探测与计量评价技术.