

文章编号:1004-9037(2013)06-0000-00

利用二次相关改进的广义互相关时延估计算法

周康辉¹ 董万胜² 刘恒毅² 杨 磊³ 马 祥³

(1. 国家气象中心,北京,100081;2. 中国气象科学研究院,北京,100081;3. 重庆市气象局,重庆,401147)

摘要:为了提高传统广义互相关时延估计算法的性能,将二次相关时延估计算法与广义互相关时延估计算法相结合,提出了一种利用二次相关改进广义互相关的时延估计新算法。该算法先对信号进行二次相关处理,利用相关函数抑制了噪声的干扰,然后在相关函数序列上进行权重处理,进一步提高了算法的抗噪声性能与估算精度。仿真实验证明新算法较广义互相关算法性能有了明显的提升,对闪电辐射源定位资料的分析也验证了该算法的有效性。

关键词:时延估计; 广义互相关; 二次相关; 辐射源定位

中图分类号:  **文献标志码:** A

Improved Generalized Cross Correlation Method for Time Delay Estimation by Using Second Correlation

Zhou Kanghui¹, Dong Wansheng², Liu Hengyi², Yang Lei³, Ma Xiang³

(1. National Meteorological Center, Beijing, 100081, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081, China;

3. Chongqing Bureau of Meteorology, Chongqing, 401147, China)

Abstract: In order to improve the performance of the generalized cross correlation (GCC) method for time delay estimation, a new arithmetic combined with GCC and second correlation has been proposed. The main process of the new arithmetic is as the GCC method except that the signals are auto-correlated and inter-correlated before the weighting processing. Simulation tests indicated that its performance of anti-interference and precision is better than GCC. To verify the proposed method, the artificially triggered lightning data is processed, It proved that the new arithmetic could be competent to the lightning radiation source location and increase the location accuracy effectively.

Key words: time delay estimation; generalized cross correlation (GCC); second correlation; radiation source location

引 言

闪电 VHF 辐射源定位技术是一种捕获闪电放电过程中产生的甚高频辐射电磁波^[1-2], 利用其到达不同天线的先后(时间或相位)关系对闪电放电过程进行定位的技术。由于辐射源定位技术能很好地揭示闪电起电放电过程,近年来备受关注,并取得了一系列重要观测成果^[3-4],在研究闪电的发生发展过程与雷暴起电机中起到重要的作用。时延估计是闪电辐射源定位中的一项关键技术,时

延估计的精度和鲁棒性是关系到辐射源定位精确与否的关键因素。广义互相关时延估计(Generalized cross correlation, GCC)是时延估计领域的经典方法,该方法利用加权函数增强了信号中信噪比较高的频率的作用,从而提高了时延估计精度,但是抗噪声性能有限^[5]。近年来提出的二次相关时延估计算法利用相关函数能有效抑制噪声的干扰,提高时延估算的抗噪声性能^[6]。本文在综合分析了 GCC 与二次相关时延估计算法的基础上,将二者结合,提出一种基于二次相关的广义互相关时延估计算法。该算法能有效结合二者的优点,提高时

延估算精度与抗噪声性能。

1 闪电辐射源定位信号模型

闪电的放电击穿过程产生频率范围很宽且连续的电磁辐射,主要辐射频段从几十赫兹覆盖到几百兆赫兹^[1]。闪电辐射源定位系统通过测量电磁辐射信号到不同天线间的相位差或时间差关系进而定位辐射源。如图 1 所示,A、B 是系统中的两个平板天线,距离 d 为基线长度,在 d 较小时,远处辐射源的辐射场可以认为是平面波。

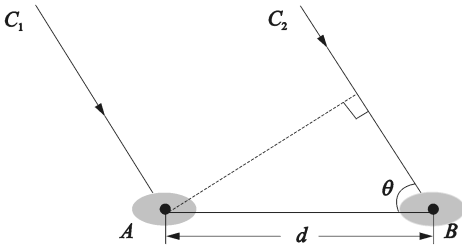


图 1 闪电辐射源入射角测量原理

假设两个天线接收信号的离散时间信号模型为

$$\begin{aligned} x_1(n) &= s(n) + n_1(n) \\ x_2(n) &= s(n - D) + n_2(n) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $s(n)$ 为辐射源信号, $n_1(n)$ 和 $n_2(n)$ 为加性噪声, D 为时间延迟。

$x_1(n)$, $x_2(n)$ 在时域上会存在时间差 ΔT ,时间差与入射角存在固定对应关系,如下式

$$\Delta t = \frac{d \cos \theta}{c} \quad (2)$$

通过求取时间差,利用式(2)可以确定入射角。测量辐射源产生的电磁波在多基线天线阵列中的入射角,然后通过一定的几何运算,就能得到闪电辐射源的二维闪电定位^[7]。

2 广义互相关与二次相关时延估计

2.1 基本相关方法

对 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 求相关函数是求取时延的基本方法。两信号的互相关函数 $R_{12}(\tau)$ 可表示为

$$\begin{aligned} R_{12}(\tau) &= E[x_1(n)x_2(n - \tau)] \\ R_{12}(\tau) &= E[s(n)s(n - D - \tau)] + \\ &E[s(n)n_2(n - \tau)] + \\ &E[s(n - D - \tau)n_1(n)] + \\ &E[n_1(n)n_2(n - \tau)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$(4)$$

假设信号与噪声以及噪声与噪声之间两两互不相关,所以上式可变为

$$R_{12}(\tau) = E[s(n)s(n - D - \tau)] = R_{ss}(\tau - D) \quad (5)$$

由自相关函数的性质知,当 $\tau - D = 0$ 时, $R_{12}(\tau)$ 取得其最大值。因此求得 $R_{12}(\tau)$ 的最大值对应的 τ 就是两个天线之间的时间延迟。

2.2 广义互相关时延估计

由于使用互相关函数直接求取时延可能存在较大的偏差,所以为了获得比较好的时延估计精度,需要对估计的互相关函数进行平滑^[8]。

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \int_0^\pi \psi_{12}(\omega) G_{x_1 x_2}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega = \int \Phi_{x_1 x_2}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \quad (6)$$

式中: $G_{x_1 x_2}(\omega) = E\{X_1(\omega) * X_2(\omega)\}$ 为两信号的互功率谱; $\Phi_{x_1 x_2}(\omega)$ 为广义互相关谱; $\psi_{12}(\omega)$ 为窗函数。以下为两种常用的典型窗函数:

(1)平滑相干变换窗

$$\psi_{12}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{G_{x_1}(\omega) * G_{x_2}(\omega)}}$$

其中: $G_{x_1}(\omega)$, $G_{x_2}(\omega)$ 分别为信号 x_1 与 x_2 的功率谱。

(2)最大似然窗

$$\psi_{12}(\omega) = \frac{1}{|\gamma_{x_1 x_2}(\omega)|} \frac{|\gamma_{x_1 x_2}(\omega)|}{|1 - |\gamma_{x_1 x_2}(\omega)|^2}$$

式中: $|\gamma_{xy}|^2 = \frac{|G_{x_1 x_2}(\omega)|^2}{G_{x_1}(\omega)G_{x_2}(\omega)}$ 。

2.3 二次相关时延估计

在基本互相关时延估计算法的基础上,唐娟等^[6]提出了一种基于二次相关时延估计算法。该算法先对信号进行自相关和互相关运算,然后利用得到的自相关和互相关函数,再进行相关运算,以提高信号信噪比与分辨力。

$$R_{11}(\tau) = E[x_1(n)x_1(n - \tau)] \quad (7)$$

$$R_{12}(\tau) = E[x_1(n)x_2(n - \tau)]$$

R_{11} 与 R_{12} 仍然是时间的函数,可把它们看成是一个新的信号和噪声。

$$R_{RR}(\tau) = E[R_{11}(n)R_{12}(n - \tau)] = E\{[R_{ss}(n) + R_{s n_1}(n) + R_{n_1 n_1}(n)][R_{ss}(n - D + \tau) + R_{s n_1}(n - D + \tau) + R_{n_1 n_1}(n - D + \tau) + R_{s n_2}(n + \tau) + R_{n_1 n_2}(n + \tau)]\} \quad (8)$$

忽略信号和噪声的互相关函数,式(8)可以简化为

$$R_{RR}(\tau) = R_{RS}(\tau - D) + R_{RN}(\tau) \quad (9)$$

式中, R_{RS} 代表纯信号做二次相关; R_{RN} 代表噪声做二次自相关。同一次互相关法相同,根据相关函数的特性,在 $\tau=D$ 时, $R_{RR}(\tau)$ 取得最大值,即只要找出最大值所对应的时间点,就可以得到时延。二次相关法的优越性在于相关计算过程中减少了噪声对信号的影响,与一次相关法相比可以在更低信噪比环境下估计时间延迟。

2.4 GCC 与二次相关时延估计性能分析

广义互相关时延估计与二次相关时延估计都能在一定程度上降低噪声对时延估算的影响,提高估算精度,但是同时却又存在各自的局限性。GCC 能利用权重函数提高信号中有效频谱的权重,从而提高时延估算的精度,但是在低信噪比环境下性能急剧下降;二次相关时延估计算法利用相关函数抑制噪声干扰,提高时延估计算法的抗噪声性能,但是估算精度有待提高。

利用与下文仿真实验中相同的方法,比较了 GCC(ML)与二次相关算法的性能,如图 2。从图中不难看到,GCC 在高信噪比环境下表现出更高的时延估算精度,但是随着信号信噪比的降低,二次相关表现出更好的抗噪声性能,在低信噪比环境下估算精度优于 GCC。

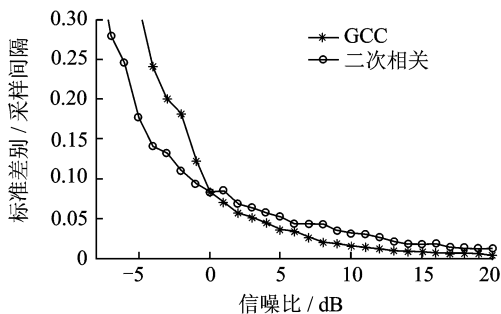


图 2 GCC 与二次相关算法性能比较

3 利用二次相关改进的广义互相关时延估计算法

总结了 GCC 与二次相关算法各自的优点与不足,在二者的基础上,本文提出了一种利用二次相关改进广义互相关算法的新型时延估计算法,称之为广义二次相关时延估计(Generalized second cross-correlation, GSCC)。

GSCC 算法流程如图 3 所示,与传统的广义互

相关算法不同的是,在功率谱密度函数进行加权处理以前,新方法首先对源信号 $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 进行相关处理,分别得到自相关与互相关序列。在此基础上,将 R_{11} 与 R_{12} 看作新的信号序列,进行广义加权处理,从而得到功率谱 $G_{R_{11},R_{12}}(\omega)$ 。将功率谱进行反傅里叶变换,然后对得到的广义互相关序列进行峰值检测,便能得到时延。

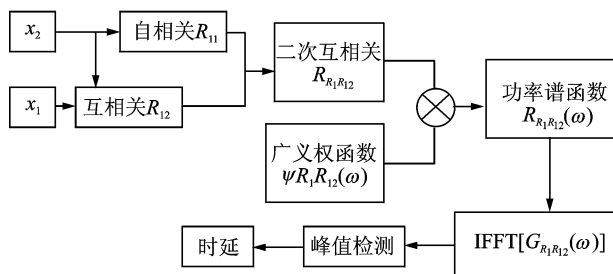


图 3 GSCC 算法流程图

4 仿真实验

为了检验 GSCC 的性能,构造了信号加噪仿真实验。图 4 为闪电辐射源探测系统观测到的一段采样频率 1 GHz、采样精度 8 bit、信号持续时间 $2 \mu\text{s}$ 的闪电辐射时域信号 S_1 。将 S_1 时间延迟 $\tau=20$ 个采样间隔,得到 S_2 。在 S_1, S_2 的基础上,分别加入已知信噪比的高斯白噪声,得到 S'_1, S'_2 。

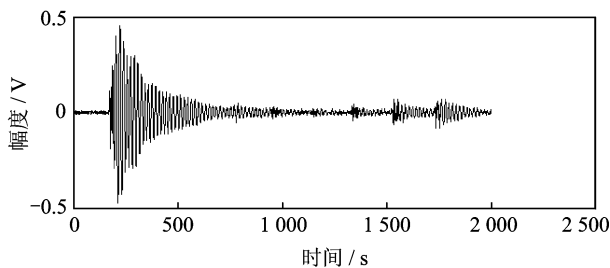


图 4 闪电高频辐射信号

定义时延估算标准差为 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{\tau}_i - \tau)^2}{N}}$ 。分

别利用 GCC 与 GSCC 对加入不同信噪比噪声的 S'_1, S'_2 进行 $N=100$ 次时延估算,进而统计不同噪声水平下的时延估算标准差(图 5 与图 6)与估算准确率(表 1)。

从图 5,6 可以看到,随着信噪比的降低,两种算法的估算精度都呈下降趋势。但是在噪声增大过程中,GSCC 比 GCC 表现出更好的性能,主要表现在两方面:

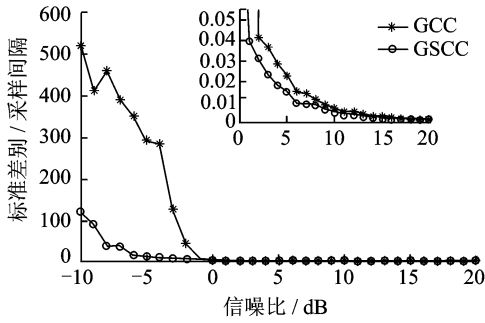


图5 加最大似然窗的两种算法对比(内图为局部放大,下同)

(1)估算精度:从图5,6中不难看出,不管是在信噪比高,还是信噪比低的情况下,GSCC都表现出比GCC更好的估算精度。经统计,在信噪比 $-10\sim 20$ dB分布区域,加ML窗与Scot窗的GSCC估算精度比GCC相关分别平均提高48.1%、30.5%,信噪比越低,对时延估计精度的改善越明显。

(2)抗噪声性能:从表1可知,在信噪比大于0

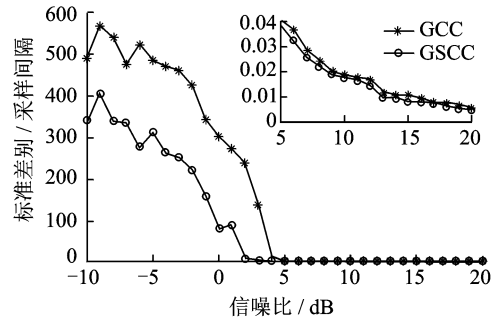


图6 加平滑相干窗的两种算法对比

时,加最大似然窗与平滑相干窗的GCC与GSCC算法基本能100%得到时间延迟,估算准确率区别不大;信噪比小于0时,两种算法都开始出现误估算,从表1中可以看到利用二次相关改进的广义相关法表现出更好的鲁棒性。如信噪比为 $-1\sim -3$ dB时,GSCC(ML窗)能100%得到时延,而GCC则出现了误估算。在整个噪声增大过程中,GSCC的估算准确率也明显高于GCC。

表1 GCC与GSCC的估算正确率(%)对比

方法	信噪比										
	0~20	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	10
GCC(ML)	100	99	98	94	88	86	75	74	53	40	18
GSCC(ML)	100	100	100	100	99	95	89	82	70	71	49
GCC(Scot)	97~100	97	97	86	85	77	68	50	38	24	14
GSCC(Scot)	99~100	99	98	91	85	83	79	71	54	36	23

5 GSCC在闪电辐射源定位中的应用

为了检验GSCC的实际应用效果,本文利用该算法处理了2007年7月1日12:06:06发生于广东省从化市的一次人工触发闪电的短基线宽带系统定位资料,得到了闪电辐射源的二维定位图。

图7(a,b)为GSCC的定位结果,可以看到本次人工触发闪电的持续时间330 ms左右。闪电起始阶段,在低仰角区域探测到连续的、向上发展的辐射源,对应本次闪电向上发展的正先导。因为闪电发生位置已知,可以根据先导仰角的变化速度推断先导的发展速度为 2.5×10^5 m/s,与前人观测到

的上行正先导的发展速度一致^[9-10]。正先导过程之后,在远离先导的位置,出现了连续、大范围的辐射源通道,可以推断这是在先导过后,云内的大范围的击穿过程。整个云内击穿过程持续了200 ms左右,从方位角 -150° 的上空发展到 0° 方位角的上空,到达上行正先导的区域后,产生了一次直窜先导,推算其发展速度为 8.1×10^6 m/s,也与之前的观测结果一致^[11]。图7(c,d)为传统GCC算法的定位结果,对比两种算法的定位结果可以发现,GSCC与GCC定位的闪电通道基本一致,证明GSCC的定位结果是合理可信的。仔细观察图7中4幅图中的辐射源分布,可以发现GSCC的定位结果更为连贯、紧凑、散乱的辐射源定位点更少,表明GSCC具有更好的估算精度与抗噪声性能。

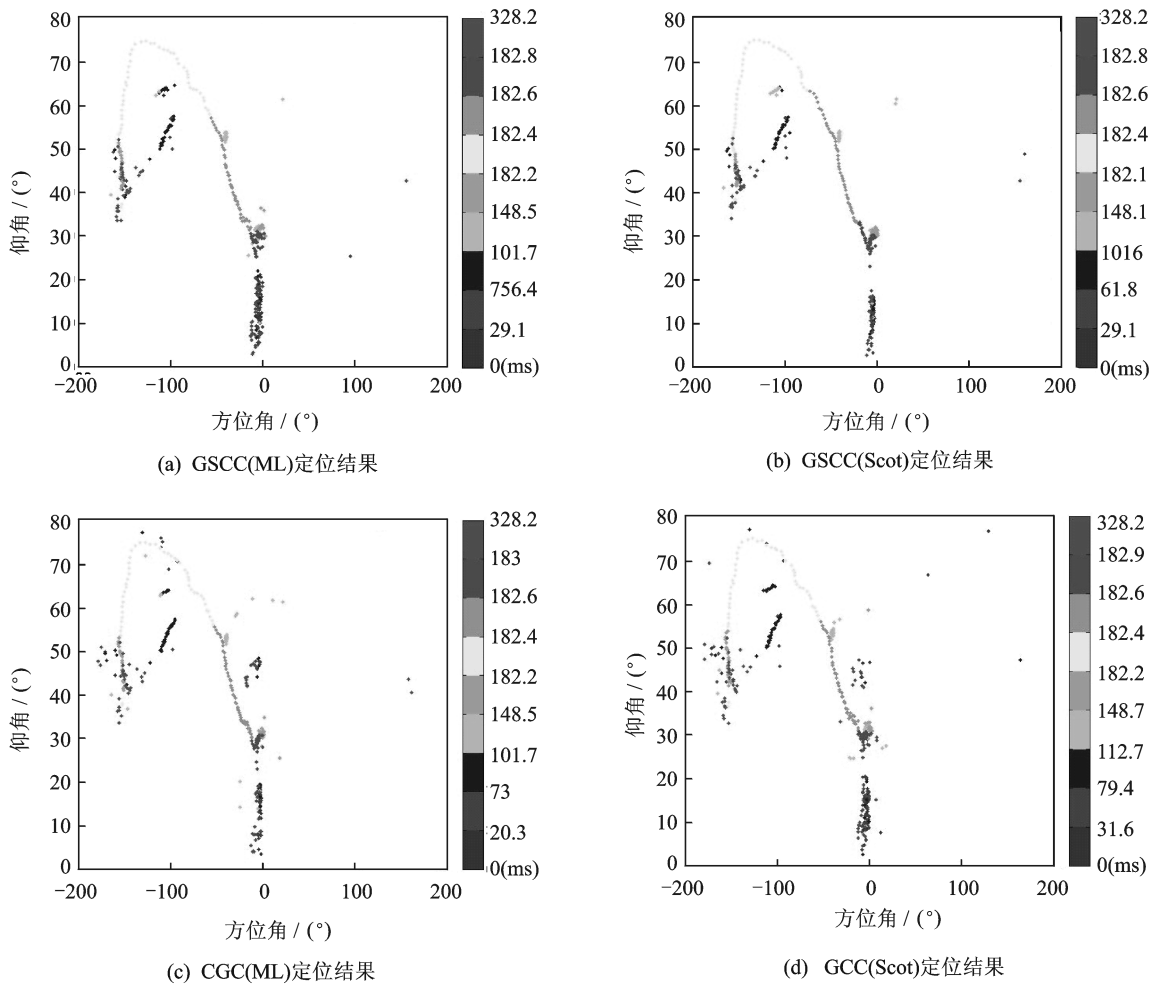


图7 一次人工触发闪电的闪电辐射源定位(定位点的色标对应其发生时间先后关系)

6 结束语

广义互相关时延估计是时延估算领域的经典算法,具有较高的估算精度,但是在低信噪比情况下性能急剧下降。二次相关利用相关函数,能有效抑制噪声的干扰,提高时延估计的抗噪声性能,但是精度却有待提高。在综合二者优势的基础上,本文利用二次相关改进了传统广义互相关时延估计算法,使时延估算精度与抗噪声性能得到了显著提高,具有较强的实用性。

参考文献:

- [1] Rhodes C T, Shao X M, Krehbiel P R, et al. Observations of lightning phenomena using radio interferometry [J]. J Geophys Res, 1994, 99: 13059-13082
- [2] Liu H, Dong W, Wu T, et al. Observation of compact intracloud discharges using VHF broadband interferometers [J]. J Geophys Res, 2012, 117:

D01203.

- [3] 董万胜,刘欣生,鄢秀书,等.甚高频闪电辐射源的定位与同步观测试验[J].自然科学进展,2001,11:955-959.
Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Qie Xiushu, et al. The VHF lightning radiation source location and simultaneous observation experiment [J]. Progress in Natural Science, 2001, 11:955-959.
- [4] Yoshida S, Biagi C J, Rakov V A, et al. The initial stage processes of rocket-and-wire triggered lightning as observed by VHF interferometry [J]. J Geophys Res, 2012, 117: D09119.
- [5] 行鸿彦,唐娟.时延估计方法的分析[J].声学技术,2008,27(1):110-114.
Xing Hongyan, Tang Juan. Analysis and survey of algorithms for time-delay estimation [J]. Technical Acoustics, 2008, 27(1): 110-114.
- [6] 唐娟,行鸿彦.基于二次相关的时延估计方法[J].计算机工程,2007,33(21):265-267.
Tang Juan, Xing Hongyan. Time delay estimation based on second correlation [J]. Computer Engineer-

- ing. 2007,33(21):265-267.
- [7] 张泉, 鄯秀书, 张广庶. 短基线时间差闪电辐射源探测系统和初步定位结果[J]. 高原气象, 2003, 22(3): 226-234.
- Zhang Quan, Qie Xiushu, Zhang Guangshu. Short-Baseline time-of-arrival lightning radiation detection system and preliminary location result[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(3): 226-234.
- [8] Knapp C H, Carter G C. The generalized correlation method for estimation of time delay [J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [9] 董万胜, 刘欣生, 张义军, 等. 一次人工触发闪电的宽带干涉仪观测[J]. 科学通报, 2001, 46(5): 427-432.
- Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Zhang Yijun, et al. The observation of an artificial triggering lightning using Broadband interferometer [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(5): 427-432.
- [10] 李俊, 吕伟涛, 张义军, 等. 一次多分叉多接地的空中触发闪电过程[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 95-100.
- Li Jun, Lü Weitao, Zhang Yijun, et al. An altitude-triggered lightning with multiple branches and ground contacts [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(1): 95-100.
- [11] 陈渭民. 雷电学原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 152-156.
- Chen Weimin. The theory of lightning [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 152-156.

作者简介:周康辉(1987-),男,硕士研究生,研究方向:闪电探测, E-mail: zhoukanghui@gmail.com; 董万胜(1964-),男,研究员,研究方向:闪电探测与雷电物理; 刘恒毅(1981-),男,助理研究员,研究方向:闪电探测与雷电物理; 杨磊(1983-),男,工程师,研究方向:闪电探测与雷电防护; 马祥(1981-),男,工程师,研究方向:闪电探测与网络技术。

