中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 1 期: 113 ~ 126
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

低频电场变化探测阵列建设及其初步运行结果

史东东[1,2], 郑栋[1*], 张阳[1], 张义军[1], 黄治钢[1], 吕伟涛[1], 陈绍东[3], 颜旭[3]

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081;
2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;
3. 中国气象局热带海洋气象研究所, 广州 510080

* 通讯作者, E-mail: zhd@camscma.cn

收稿日期: 2017-01-23; 接受日期: 2017-06-16; 网络版发表日期: 2017-09-01
国家自然科学基金项目(批准号: 41675005、91537209和41275008)和中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目(编号: 2016Z002、2015Z006)资助

摘要 在低频(LF)和甚低频(VLF)频段探测全闪活动是近年来闪电探测技术发展的一个重要方向. 中国气象科学研究院于2014~2015年在广州地区建设了由9个快电场变化测量仪构成的低频闪电电场探测阵列(Low-frequency E-field Detection Array, LFEDA). 本文介绍了LFEDA构成以及针对闪电低频电场信号建立的闪电定位算法. 基于蒙特卡罗法和人工触发闪电试验对LFEDA的定位精度和探测效率进行了理论模拟和客观评估. 前者表明站网中, 具有较长基线的定位站有助于改善垂直于该基线方向的水平定位精度和沿着该基线方向的高度定位精度. 后者表明LFEDA对触发闪电事件和回击的探测效率分别为100%和95%, 回击平面定位误差平均值为102m. 定位结果与雷暴结构的对比分析表明, 闪电脉冲放电事件与反射率柱所表征的对流特征较强区域有较好对应, 脉冲放电事件在垂直方向上呈现合理的分布. 此外, 通过单次云闪、地闪的定位结果发现, LFEDA能够描绘闪电发展形态, 基于三维定位结果获得的云闪初始阶段垂直发展速度以及地闪先导垂直发展速度变化趋势与之前观测结果类似. 研究结果表明, LFEDA具备了全闪电三维定位能力, 为闪电发展特征研究以及雷暴电学研究提供了新的技术手段.

关键词 LFEDA, 定位算法, 蒙特卡罗, 人工触发闪电, 雷达反射率

1 引言

根据传感器位置的不同, 闪电探测系统(LLS-Lightning Location System)可分为星载和地基两类. 相较于极轨卫星闪电探测系统(如OTD和LIS(Cecil等, 2014), 地基探测系统具有实时且连续的闪电定位能力, 在雷暴天气监测、闪电过程研究方面具有更为广泛的应用. 在多个国家或地区建设的地闪探测网主要在低频(Low Frequency, LF)或甚低频(Very Low Frequency, VLF)频段探测地闪回击的时间和二维位置信息, 当前这样的网络普遍采用了磁定向法(Magnetic Direction Finder, MDF)和时差法(Time of Arrival, TOA)的混合定位技术(Honma等, 1998). 其中颇具影响力的美国NLDN(National Lightning Detection Network)(Cummins

中文引用格式: 史东东, 郑栋, 张阳, 张义军, 黄治钢, 吕伟涛, 陈绍东, 颜旭. 2018. 低频电场变化探测阵列建设及其初步运行结果. 中国科学: 地球科学, 48: 113–126, doi: 10.1360/N072016-00320
英文引用格式: Shi D D, Zheng D, Zhang Y, Zhang Y J, Huang Z G, Lu W T, Chen S D, Yan X. 2017. Low-frequency E-field Detection Array (LFEDA)—Construction and preliminary results. Science China Earth Sciences, 60: 1896–1908, doi: 10.1007/s11430-016-9093-9

© 2017 《中国科学》杂志社

等, 1998; Cummins和Murphy, 2009)系统在雷电监测、闪电气候研究、雷暴电学研究等领域中均发挥重要作用. 中国也建设了一个基本覆盖全国的地闪探测网络(张义军等, 2006; Xia等, 2015), 服务于强对流天气监测、雷电灾害调查、大气电学研究等领域.

传统的LF/VLF闪电探测网主要给出地闪回击的位置信息以及反演得到的回击峰值电流强度. 近年来, 在LF/VLF频段对全部类型闪电(云闪、地闪、双极性窄脉冲)定位的技术获得了快速的发展, 为未来地闪定位系统的升级提供了重要的技术储备. 美国Los Alamos国家实验室最早发展了在LF/VLF频段开展全闪电探测的LASA(Los Alamos Seferic Array)系统, 并实现了对全部类型闪电的高精度三维定位(Smith等, 2002; Shao等, 2006). 随后美国、德国、日本等研究机构也研发并建设了多个类似的探测网, 并由此开展了雷暴电学和闪电物理学方面的研究. Bitzer等(2013)基于探测频率为1Hz~400kHz的HAMMA(Huntsville Alabama Marx Meter Array)成功定位了单个地闪和云闪的发展过程并将定位结果与NALMA(The North Alabama Lightning Mapping)(在VHF频段定位)、NLDN(在LF/VLF频段定位)相比较. 结果显示, HAMMA与NLDN对地闪回击定位在平面位置上相差约300m. 对于闪电发展通道的定位, 无论是地闪还是云闪, HAMMA同NALMA的定位结果在时空上都能匹配, HAMMA对闪电初始阶段脉冲的定位信息甚至比NALMA还要丰富. Karunarathne等(2013)将基于LF/VLF的PBFA(Position By Fast Antenna)和基于VHF的LDAR2(Lightning Detection and Ranging II)的定位结果进行对比, 也发现低频闪电定位系统在捕获闪电初始阶段脉冲信息方面具有优势. 此外, Karunarathne等(2013)还将地闪初始阶段的脉冲定位信息叠加在对应的光学观测资料上, 进一步说明低频闪电定位系统对闪电发展过程具有较高的探测性能. Yoshida等(2014)在日本发展BOLT(Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorm)定位系统, 定位结果显示其对云闪、地闪的发展特征具有一定的描绘能力. 在国内, 王东方等(2009)利用7站同步快天线资料探测闪电低频电场脉冲并对5个云闪初始击穿的三维定位发现, 定位结果与雷达强回波具有良好的时空一致性. Wang等(2015)介绍了在北京及周边地区建立的一套多频段闪电探测网(Beijing Lightning Network, BLNET), 基于闪电低频电场脉冲定位信息研究了雷暴过程中的闪电活动分布情况和不同类型闪电的初始击穿发展速度、方向以及极性等特征, 研究结果与现有观测结论一致.

与基于VHF的闪电探测系统(比如LMA(Thomas等, 2004)相比, LF/VLF全闪电定位系统具有以下优势: (1) LF/VLF相比VHF信号具有更远的传播距离, 受地形影响相对较小, 站点之间的基线长度可以更长, 站网的探测范围更大; (2) LF/VLF系统对闪电类型具有更好的识别能力. 除此之外, LF/VLF系统成本相对较低, 对电磁环境的要求也低于甚高频系统, 在频段上与现有地闪定位系统类似, 相关技术可对未来定位系统升级改造提供参考.

基于上述原因, 并且为了提高大气电学研究中雷电资料的应用水平, 中国气象科学研究院研发并在广州建设了一套闪电低频电场变化探测阵列(Low-frequency E-field Detection Array, LFEDA), 开展了初步的定位和观测试验. 本文对LFEDA的研发、建设、初步观测结果、探测效率和定位精度等情况进行说明, 较为系统的介绍LFEDA性能, 为随后该系统观测资料的应用提供基础参考.

2 LFEDA系统介绍

LFEDA由中国气象科学研究院于2014年广州地区建设, 当年开展了预观测试验, 2015年初步形成由9个子站组成的探测网络, 各子站位置参见图1. 除ZCJ外, 其余8个相邻站的基线长度在6~42km, ZCJ站距离其余8站相对较远, 基线长度在30~61km, 构成较长的基线. 图1中还给出了广州野外雷电试验基地人工触发闪电试验场的位置, 在该场地开展人工触发闪电试验(Zheng等, 2013), 基于触发闪电对LFEDA系统性能的客观评估在本文4.2中介绍.

LFEDA子站的电场变化探头采用的是传统的闪电快电场变化测量仪(简称快天线)(Krehbiel等, 1979). 探测信号经过滤波处理后, 最终采集信号的频率范围为160Hz~600kHz. 数据采集基于浮动电平触发, 以排除低频变化部分对数据采集的影响; 采用1ms分段记录、采集和存储同步的方式实现电场脉冲变化信号的无死时间捕获, 其中预触发200μs. 不同子站之间通过时间精度为50ns的GPS时钟实现同步. 波形数据的采样率为10M Sa s^{-1}, 分辨率为12位.

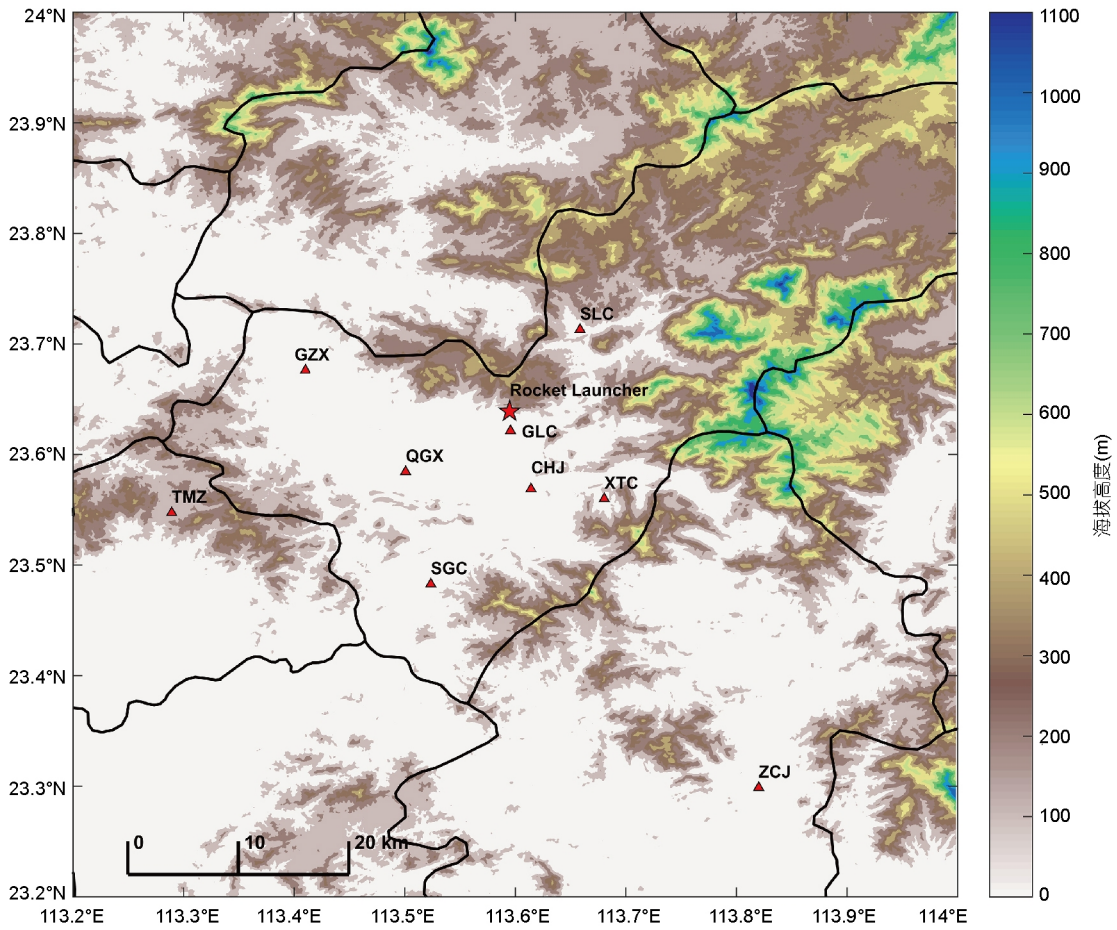


图 1　2015年广州闪电探测网络分布及地形示意图

颜色表示不同海拔高度, 单位: m. 站点分布用三角形表示: 从化气象局(CHJ)、光联村(GLC)、新田村(XTC)、神岗村(SGC)、石岭村(SLC)、官庄小学(GZX)、梯面镇(TMZ)、旗杆中学(QGX)和增城气象局(ZCJ). 五角星表示人工触发闪电试验场, 光学观测点位于GLC

3　定位算法

LFEDA主要关注闪电放电过程中产生的快速电场变化脉冲信号, 在实现定位之前, 需要3个步骤: 匹配波形、寻获脉冲、匹配脉冲. 在完成脉冲匹配之后, 获取脉冲放电事件峰值时间. 基于非线性最小二乘拟合算法, 确定脉冲放电事件的三维位置.

3.1　寻峰和匹配

波形匹配可以将包含相同脉冲放电事件、由不同子站探测到的波形提取出来. 为了尽可能找出同一闪电脉冲信号, 本文在进行波形记录匹配时, 其时间窗口取1.5倍的记录长度, 即将两两测站的记录触发时间相差在1.5ms以内的波形记录临时匹配到一起.

在匹配波形并寻获脉冲放电事件之前, 首先对波形进行Hilbert变换, 将原始波形转换为归一化的功率波形, 再从功率波形上选取峰的信息. 在寻峰过程中, 脉冲需满足如下条件: (1) 脉冲幅值需大于n倍噪音水平(n=3); (2) 相邻两个脉冲峰的时间差需大于某一时间窗(采用5或10μs), 该时间窗内取最大幅值峰作为对应脉冲的峰. 在寻获脉冲之后的脉冲匹配环节主要考虑两个因素: (1) 任意两个子站脉冲峰值的时间差需小于光在这两个子站之间的传播时间; (2) 在满足条件(1)的情况下取不同子站脉冲相对幅值最接近的匹配在一起, 由此排除可能的重复匹配状况. 图2展示了由9个站匹配的波形记录及采用上述寻峰、匹配方法得到脉冲匹配结果. 脉冲1、2和4是有9个站匹配, 可用于脉冲放电事件的三维定位. 脉冲3有QGX、 SLC、

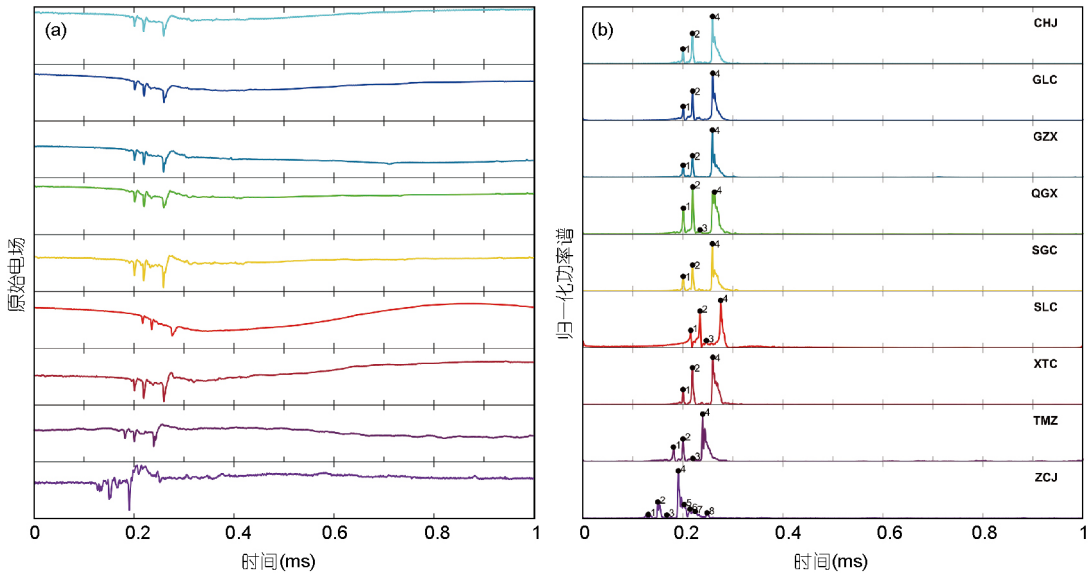


图 2　9个站共同记录到的1ms匹配波形示意图

(a) 原始波形; (b) 归一化后的功率波形, 黑色圆点代表峰的位置

TMZ和ZCJ这4个站匹配到, 可用于脉冲放电事件的二维定位. 脉冲5~8只有ZCJ记录, 则无法定位.

3.2　脉冲放电事件定位

每个脉冲被认为是闪电过程中发生的一次放电事件, 基于脉冲峰值的时间信息对该事件进行定位. 定位采用时间到达差法(Time Difference of Arrival, TDOA). 闪电信号到达子站i的时间与测站间的距离满足式(1), (x, y, z, t)表示闪电事件的时空信息, (x_i, y_i, z_i)表示子站i的空间位置, t_i为第i站接收到信号的时间, c为光速, 即$c=3\times10^8$m s^{-1}.

$$t_i = t + \frac{1}{c}\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}. \tag{1}$$

利用4个以上测站记录的t_i可以得到4个形如式(1)的方程, 组成非线性方程组. 使用Levenberg-Marquardt(L-M)算法优化数值解, 对式(1)进行拟合处理以确定函数t_i中(x, y, z, t)的值, 其中χ^2用于衡量拟合优度.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left(t_i^{\text{obs}} - t_i^{\text{fit}}\right)}{\sigma^2}, \tag{2}$$

式中, N表示共有N个站记录到相同事件, σ表示各站的时间测量误差, 该参数受GPS授时精确度、信号传播距离以及测站周边电磁环境等因素的影响, 本文将此数值定为数据时间精度, 即100ns. 计算中对拟合优度χ^2做归一化处理得到χ_v^2, 即$\chi_v^2 = \chi^2 / v$. 其中v表示自由度, $v=N-4$.

3.3　χ_v^2阈值的确定

脉冲时间的精确性直接影响TDOA算法得到的定位结果, 而各站不同的测量环境都会影响时间不确定度σ. 本次实验选取2015年8月7日00:00~03:00和8月15日15:00~16:30的雷暴过程, 利用实际定位结果(可参照本文4.1)和理论求解方程得到的拟合优度进行对比, 从而确定真实的时间不确定度σ. 排除具有明显错误的计算结果后共得到了114864个闪电脉冲放电事件, 采用Bevington(1969)的计算方法, 假设测量误差服从高斯分布. 图3是理论与实际对比结果, 其中实线是不同自由度对应的理论χ_v^2分布, 计算中σ初值选为100ns(数据时间精度). 为了得到实际的σ, 建立对应的换算公式$\chi_v^2(100/\sigma)^2$, 其中$(100/\sigma)^2$为换算因子, χ_v^2是时间误差为100ns时得到的拟合优度. 调整σ值使得理论曲线尽可能和实际曲线分布相同. 如下图所示, 6站定位结果得到的σ调整为80ns, 7站、8站和9站的定位结果将σ分别调整为75、70和65ns. 随着参与站点的增加, 时

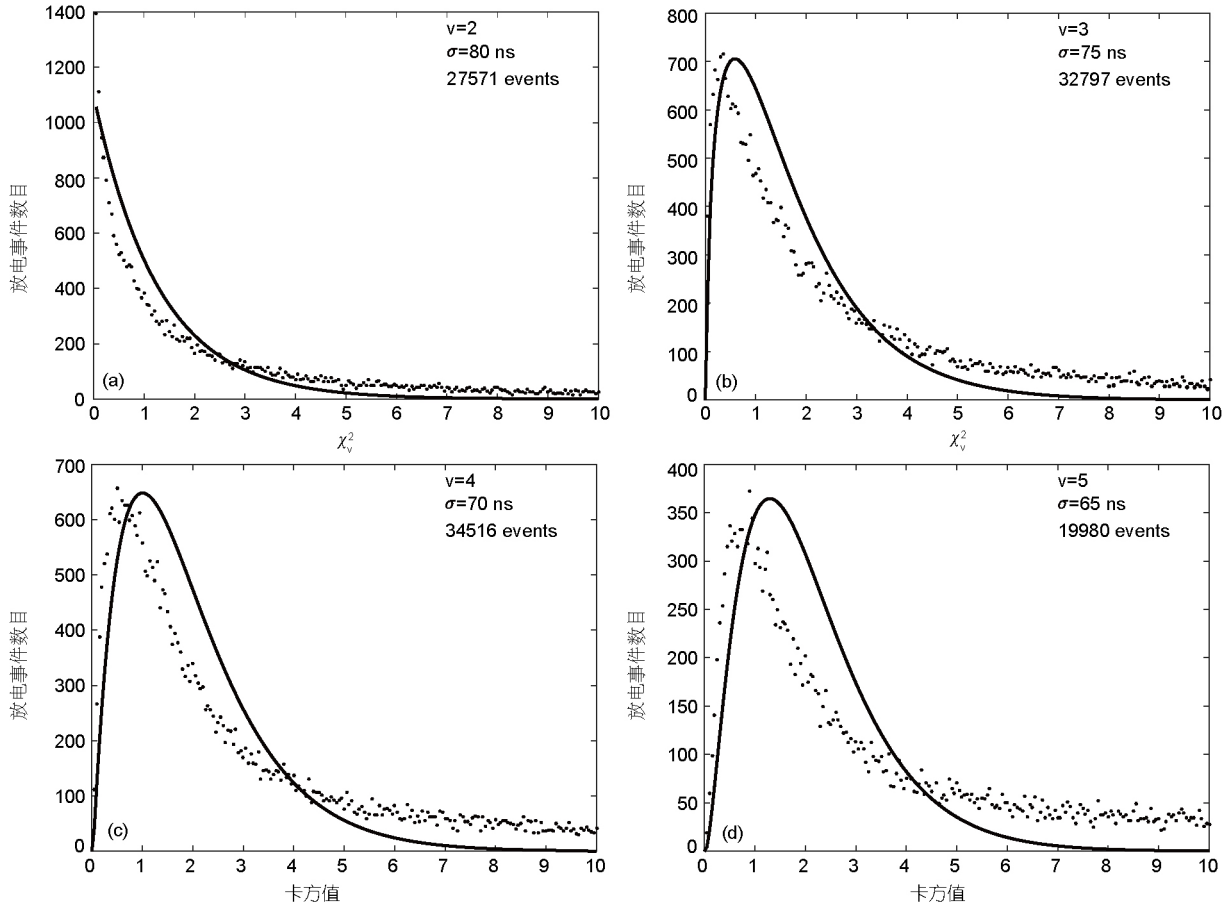


图 3　两次雷暴过程中脉冲放电事件实际数据和理论求解方程的拟合优度χ_v^2分布比较

(a) 用6个站定位解出的卡方值χ_v^2已经调整到时间误差σ=80ns; (b) 用7个站数据定位算出的卡方值χ_v^2已经调整到时间误差σ=75ns; (c) 用8个站数据定位算出的卡方值χ_v^2已经调整到时间误差σ=70ns; (d) 用9个站数据定位算出的卡方值χ_v^2已经调整到时间误差σ=65ns

间不确定度也逐步减少.

值得注意的是, 在χ_v^2大于5时, 实际数据的χ_v^2分布普遍大于理论值, 在Thomas等(2004)、Yoshida等(2014)、张广庶等(2015)相关研究中也有类似情况, 即: 测时误差分布绝大部分符合高斯分布类型, 但也有部分非高斯分布情形的存在, 如: 闪电信号经过长距离传播后到达测站的功率小或测站附近存在局部干扰, 这也是图中χ_v^2大于5的区域出现"翘尾巴"的主要成因. 因此, 本文将χ_v^2的阈值取为5.

4　性能评估

4.1　蒙特卡罗模拟

4.1.1　模拟设置

蒙特卡罗模拟是探究站网定位性能的常用方法(Koshak等, 2004; Shao等, 2006; Wang等, 2015). 本文以CHJ为中心, 对周围100km×100km的区域内以步长5km进行格点化, 每个格点分别进行200次模拟. 模拟时暂未考虑地球曲率和大气折射对电磁波传播的影响. 假设脉冲放电事件分别发生在海拔5、10和15km, 每个脉冲放电事件信息都能被9个测站同时测到, 计算脉冲放电事件到达各个站的时间并在此时间上叠加均值为0, 均方根分别为100、200、300ns的高斯随机噪声以模拟真实测量到的到达时间. 采用非线性最小二乘拟合法定位脉冲放电事件位置并计算二维平面误差和高度误差, 公式如下:

$$E_{2D}=|D_{2D}|=\sqrt{(X_{模拟}-X_{反演})^2+(Y_{模拟}-Y_{反演})^2}, \tag{3}$$

$$E_z=|D_z|=|Z_{模拟}-Z_{反演}|. \tag{4}$$

4.1.2 模拟结果

图4和5分别为平面和高度定位误差在二维平面上的投影示意图, 黑色三角形表示测站位置, 坐标(0, 0)对应CHJ站, 递变颜色代表不同区域的定位误差, 不管是平面还是高度定位误差都随距离增大而增大. 由图4和5可以看到, 固定高度上, 相同位置处脉冲放电事件平面与高度定位误差都随时间不确定度的增加而增大. 在相同时间不确定度的情况下, 平面定位误差随高度变化较小, 而垂直方向的定位误差随高度有较大变化. 与常规的TDOA定位系统类似(Thomas等, 2004; Shao等, 2006), 平面定位误差并非沿着站网长基线的方向分布. 相反, 平面误差分布垂直于网络布局, 较长基线的ZCJ站减小了垂直于阵列方向的误差, 改善了短基线稠密网络的整体定位精度.

与平面误差分布不同的是, 长基线ZCJ改善东南-西北方向的高度定位误差, 该误差随脉冲放电事件设定高度的增加而减小. Bitzer等(2013)也得到同样结论并指出受站网布局和数据时间精度影响, 只有当脉冲放电事件高度大于某一阈值时, 天线阵列才能更有效地定位高度信息.

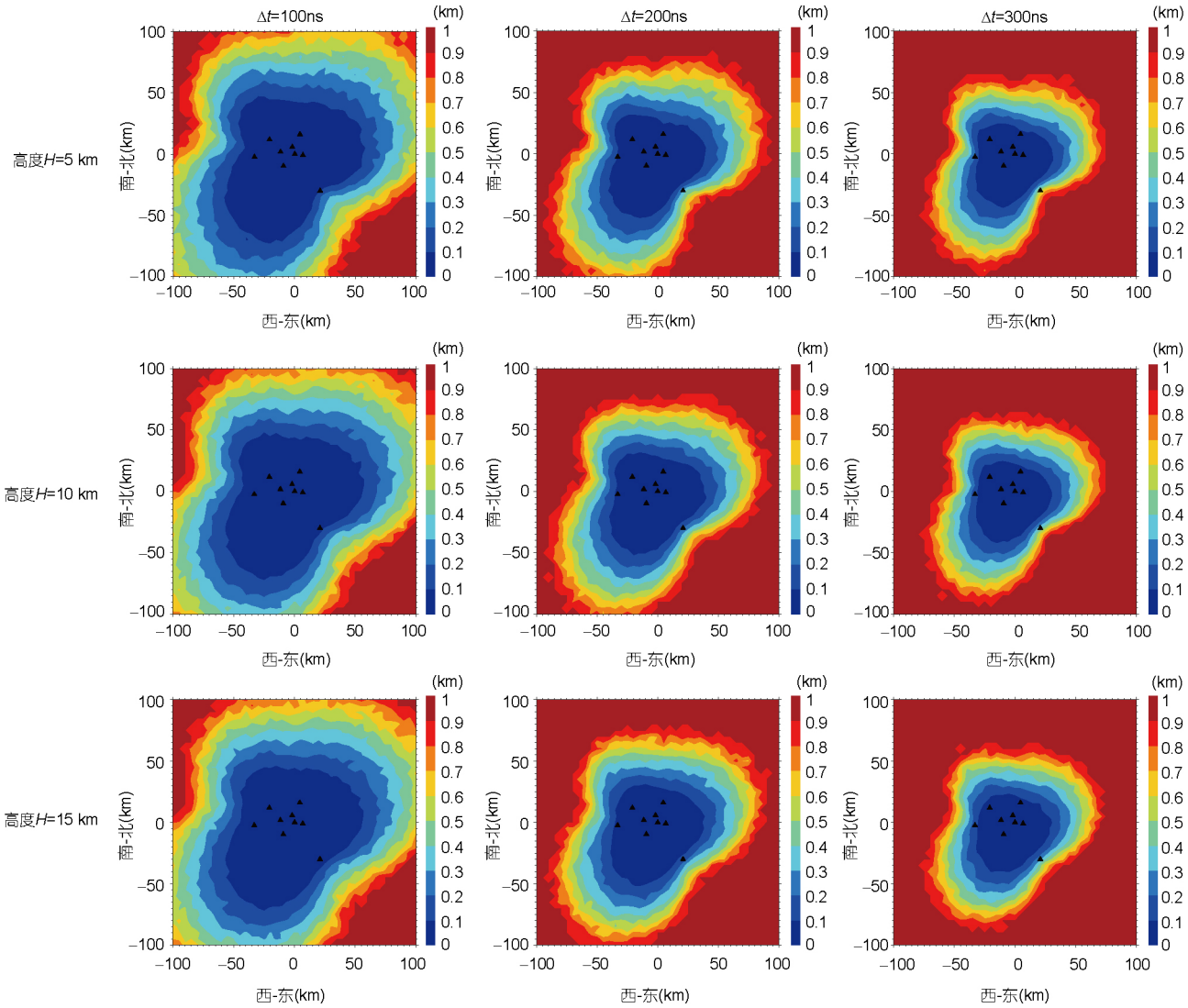


图 4　利用蒙特卡罗法模拟2015年广州LFEDA观测网在不同高度、对应不同时间不确定度情况下的水平定位误差

黑色三角形代表LFEDA测站位置

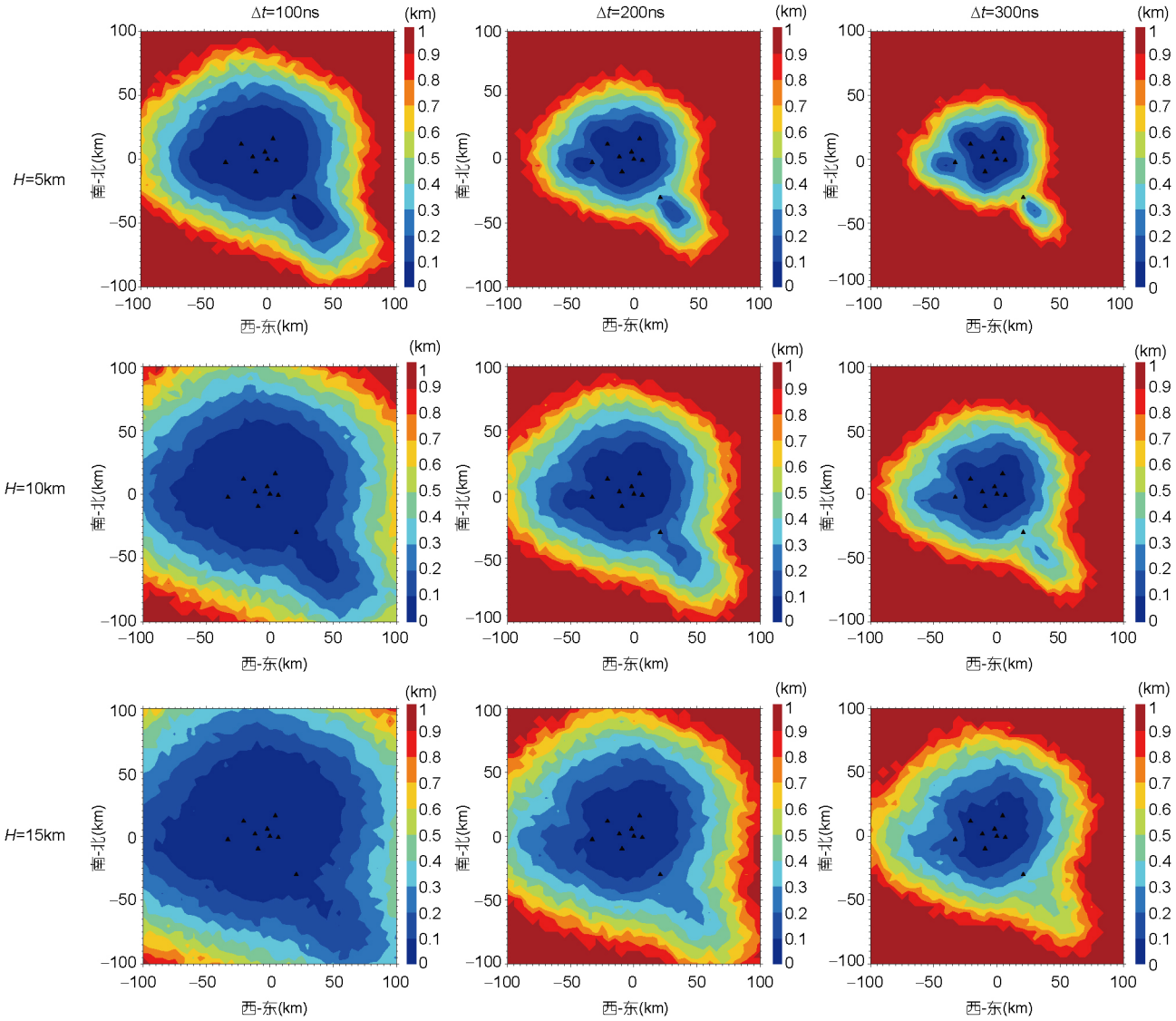


图 5　**利用蒙特卡罗法模拟2015年广州LFEDA观测网在不同高度、不同时间不确定度情况下的高度定位误差**

黑色三角形代表LFEDA测站位置

4.2　基于人工触发闪电的LFEDA探测性能客观评估

人工触发闪电提供了一种客观评估闪电定位系统性能的手段, 之前已经应用于对广东闪电定位系统的性能评估(Chen等, 2012). 2015年夏季, 广东从化人工触发闪电试验基地成功触发闪电20次, 其中6次人工触发闪电无回击, 另有1次触发闪电是在LFEDA架设之前完成, 因此我们使用剩余13例包含了76次回击的人工触发闪电评估LFEDA的性能. 回击信息是通过试验基地记录到的实际闪电电流数据进行判定, 具体信息见表1.

针对13次触发闪电, LFEDA都有探测, 并能给出至少1次回击的定位信息, 所以, 其对触发闪电的探测效率为100%(13次/13次). 在76次回击中, 共成功定位其中的72次, 其余4次回击由于对应脉冲饱和、或无记录, 无法参与定位, 此时定位算法失效. 据此估算LFEDA对回击过程的探测效率约为95%(72/76).

图6是72次回击定位结果的平面分布, 对比真实回击发生的位置(引流杆位置), 其定位误差的统计值见表2, 回击平面定位误差频数及累积概率分布见图7.

表 1　2015年人工触发闪电信息统计表

序号	人工触发闪电时间	回击次数
1	6月11日18时05分	1
2	6月11日18时22分	2
3	6月11日18时29分	11
4	6月12日16时05分	7
5	6月12日16时12分	3
6	6月12日16时16分	2
7	7月22日18时16分	9
8	7月22日18时22分	1
9	8月13日18时26分	7
10	8月13日18时32分	7
11	8月14日15时25分	13
12	8月17日16时03分	4
13	8月17日16时07分	9

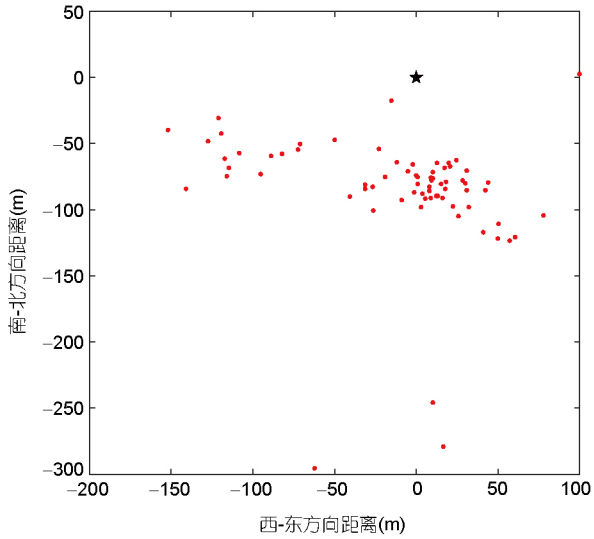


图 6　LFEDA对人工触发闪电回击过程的定位结果平面位置分布

五角星表示人工触发闪电试验场引流杆位置, 也即回击的接地点位置

表 2　回击定位结果误差统计(m)

	东-西	南-北	平面
平均值	40	84	102
中值	25	79	90
均方差	40	45	44

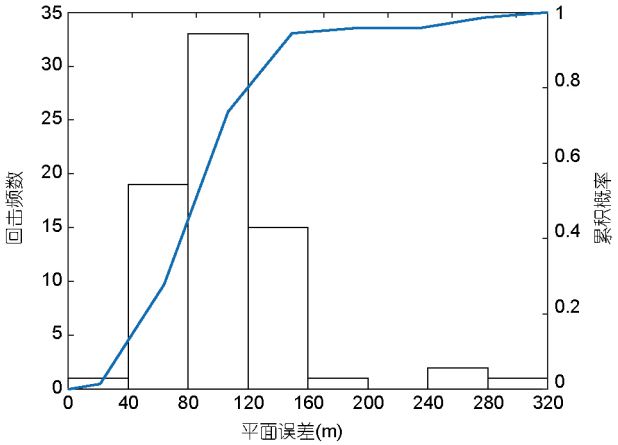


图 7　人工触发闪电回击定位的平面误差频数柱状图及累积概率分布图

结果显示96%(69/72)的回击定位结果距离引雷点小于200m, 其中定位误差峰值集中在80~120m. 利用蒙特卡罗模拟已经得到引雷点所处位置的理论平面误差在时间不确定度是100、200、300ns的情况下分别为20、41、63m, 然而表2数据表明回击平面误差平均值为102m. 实际的定位误差大于理论平面定位误差, 这是因为蒙特卡罗模拟只考虑了数据本身的误差, 而环境、噪音、地形等都可能影响实际观测误差; 并且在蒙特卡罗模拟中考虑的放电点源, 而实际对应脉冲的闪电放电事件是空间中的一段闪电通道.

值得注意的是, 回击平面定位结果相比实际位置(图6中五角星表示的引流杆)整体偏南. 针对人工触发闪电的回击定位, 我们分析发现对定位结果南北分布影响最大的站是SLC. 该站接收回击信号的时间比信号理论到达时间延迟了约400ns, 导致定位结果整体偏南, 如果考虑400ns的延迟, 则定位结果如图8a所示, 此时, 南北方向平均定位误差为31m, 定位结果在南北方向近乎均匀分布, 而回击接地点位置的平面定位误差是68m, 南北方向及平面定位误差明显得到改善. 此外, 我们还计算了触发闪电回击在各站引起的电场变化脉冲上升沿特征(10~90%上升时间), 它们的分布在图8c中给予展示, 同时图8b给出了各子站距离触发闪电位置的水平距离. 可以看到, 整体上随着距离的增加, 10~90%上升时间呈现增大特征, 这是由于地表对信号的滤波效应引起的. 但注意, SGC、XTC、TMZ这三个站, 虽然距离试验场的距离都比SLC距离试验场的距离远, 但10~90%的上升时间整体分布仍然要小

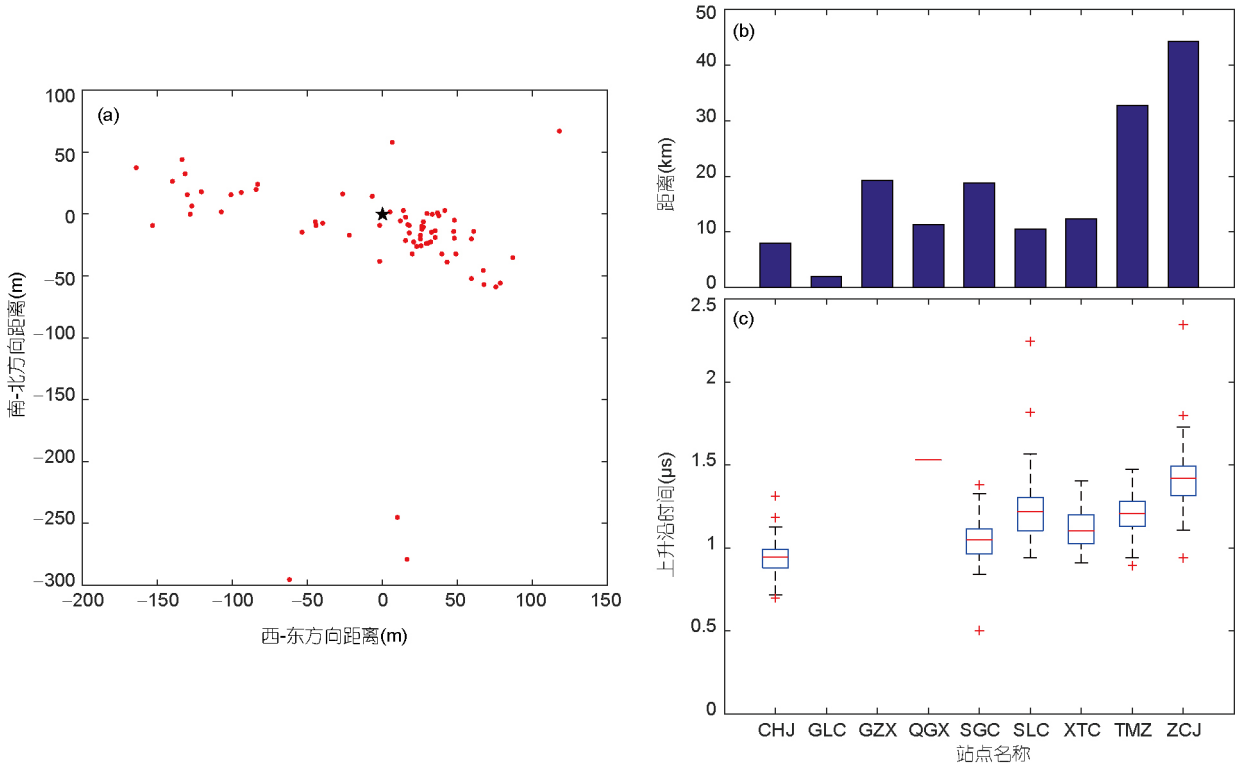


图 8　(a)将SLC站触发闪电对应电场变化脉冲峰值时间迁移400ns后的触发闪电回击定位位置、(b)试验场至各个测站的距离、(c)不同测站记录的人工触发闪电回击波形的10~90%上升沿时间箱线图

于SLC. 从图1看, SLC和人工触发闪电试验场地之间有明显的山地, 而上述其他站点与试验场之间地形变化相对较为平缓. 这表明SLC和试验场之间山地的存在可能导致SLC观测到的触发闪电回击电场变化脉冲峰值后移. 起伏地形对电场变化信号的这种影响也被张其林等(2013)、Li等(2016)通过模拟所研究. 他们在研究中指出, 起伏地形对地闪首次回击垂直电场的影响较小, 但对继后回击(触发闪电回击过程与自然闪电的继后回击过程类似)影响明显, 当地形起伏加剧时, 继后回击不仅峰值衰减, 而且时域脉冲波形上升沿时间增大, 即峰值位置向后偏移.

5　定位结果及分析

5.1　雷暴过程

2015年8月15日15:00~16:30期间LFEDA站网附近发生了多单体雷暴过程, 自西南向东北方向发展, 图9展示了15:00~16:30脉冲放电事件定位结果分布状况. 由图可知, 闪电脉冲放电事件移动路径(图9b)与实际雷暴发展过程(图9a)有较好的一致性. 图10是15:54~16:00雷达回波及对应时段内的脉冲放电事件三维定位结果分布图. 期间共定位5047个脉冲放电事件, 雷达组合反射率大于30dBZ的区域内脉冲放电事件频数累积分布4844个, 占总频数的96%(4844/5047), 定位结果与雷达强回波有很好的一致性. 需要注意的是, 结合图10a和10b, 组合反射率中部分强回波区域由低层降水所致, 所以图10a中强回波地区并不都是对应闪电活动区域. 从图10b来看, 雷达剖面图显示有两处明显的反射率柱, 35~40dBZ雷达回波顶高达到14km, 说明该区域具有较强的对流特征, 而脉冲放电事件的定位结果主要位于这些反射率柱的区域. 上述结果表明LFEDA的定位结果具有高度可靠性, 基于LFEDA系统对脉冲放电事件的定位能够为雷暴过程监测, 雷暴尺度内的闪电活动特征研究等提供有价值的观测数据.

5.2　闪电个例

5.2.1　云闪

图11是发生在2015年8月15日16时26分24秒(北京

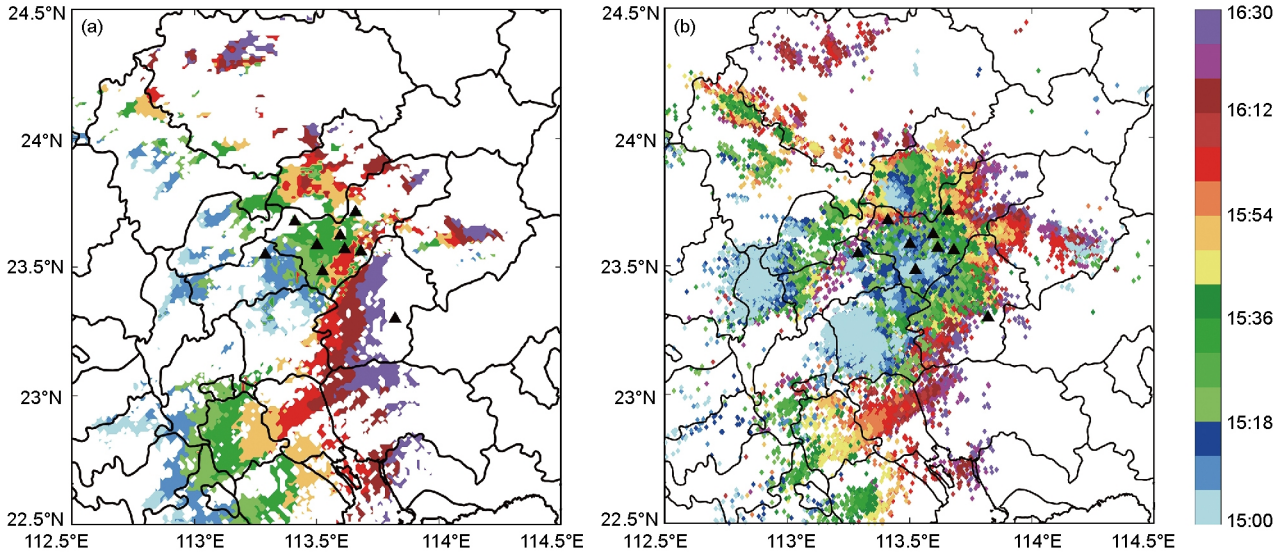


图 9　2015年8月15日15:00~16:30雷暴过程LFEDA脉冲放电事件定位结果

(a) 雷达回波大于50dBZ区域在15:00~16:30期间的移动路径; (b) 脉冲放电事件平面位置随时间变化的分布

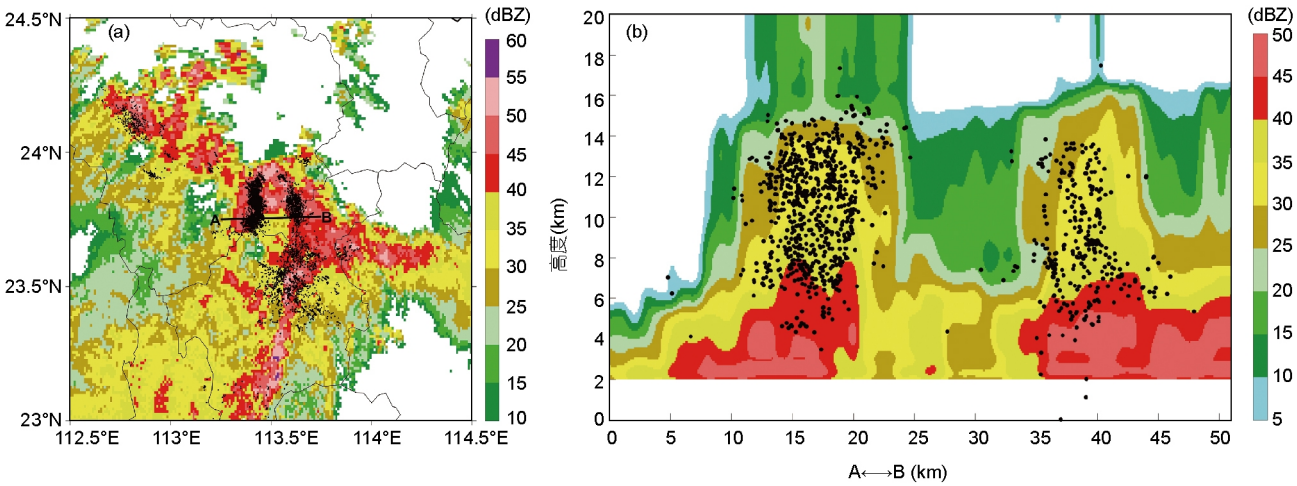


图 10　2015年8月15日15:54~16:00雷达反射率叠加LFEDA脉冲放电事件三维定位结果分布图

(a) 组合反射率与脉冲放电事件定位结果的平面叠加; (b) 沿图10a中A-B剖面的反射率与脉冲放电事件垂直方向的叠加(以剖面为中心正负4km范围内的脉冲放电事件)

时间)一次云闪放电过程的三维定位结果. 图12是叠加脉冲放电事件高度信息的GLC电场变化波形. 此次云闪共定位322个脉冲放电事件. 定位结果在高度上呈现较为明显的双层结构(图11a和12a), 中心位置对应高度分别是5和10km. 闪电初始阶段向上发展持续时间约为25ms(图12b), 前10ms对应的初始击穿段从高度7.0km垂直向上发展, 上升至9.7km, 二维垂直平均向上速度为2.59×10^5m s^{-1}, 在10~25ms内二维垂直向上速度减缓至4.00×10^4m s^{-1}, 高度由9.7km增加至10.2km, 整个初始击穿垂直平均速度为1.32×10^5m s^{-1}(图12b), 该速度与张广庶等(2010)、Yoshida等(2014)、Wu等(2015)等研究结果中提及到云闪初始阶段垂直速度量级为10^5m s^{-1}一致. 随后闪电通道主要以水平发展为主, 高度上有一定起伏, 整个闪电过程持续时间约2s.

5.2.2　地闪

图13是发生在2015年8月15日15时03分15秒一次先导-回击过程的三维定位结果. 图14是叠加脉冲放

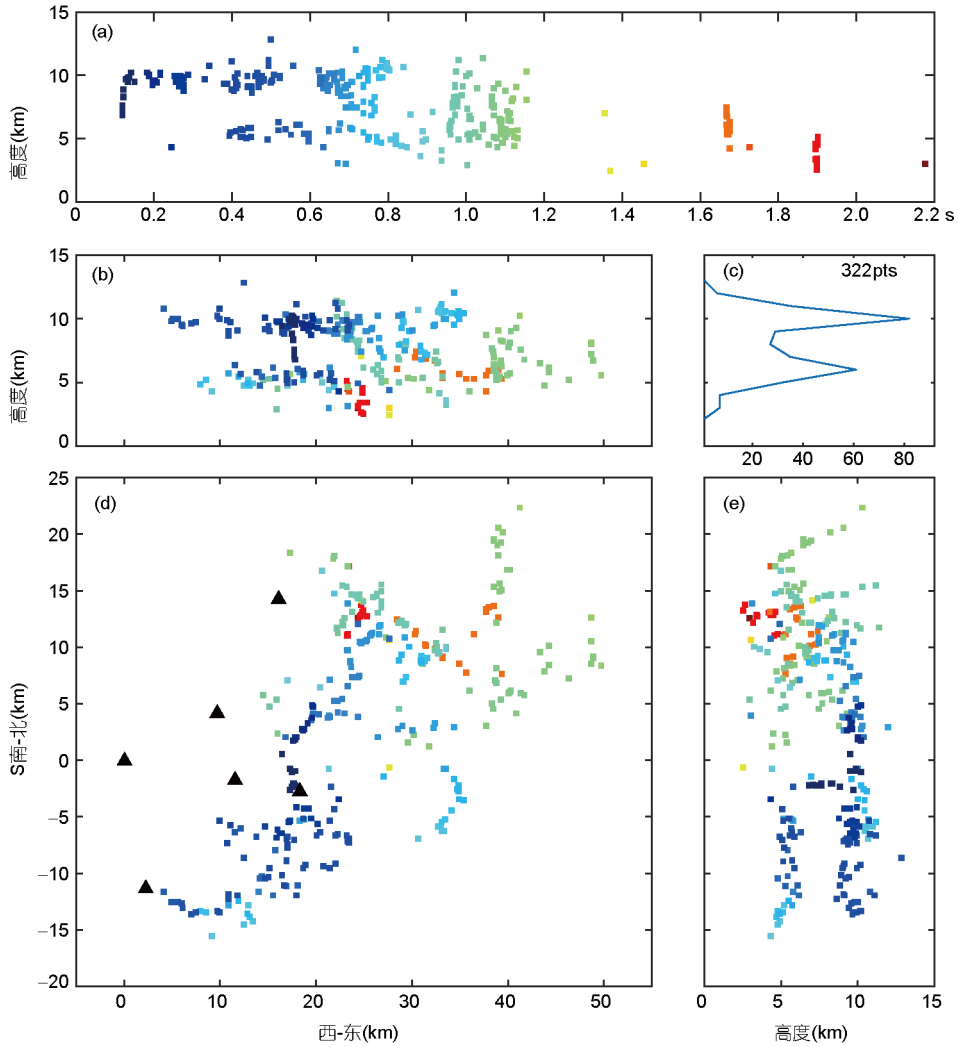


图 11　**发生于2015年8月15日16时26分24秒的云闪脉冲放电事件三维定位结果示意图**

(a) 脉冲放电事件高度随时间的变化; (b) 东西方向上的立面投影; (c) 脉冲放电事件频数随高度的变化; (d) 平面投影; (e) 南北方向上的立面投影

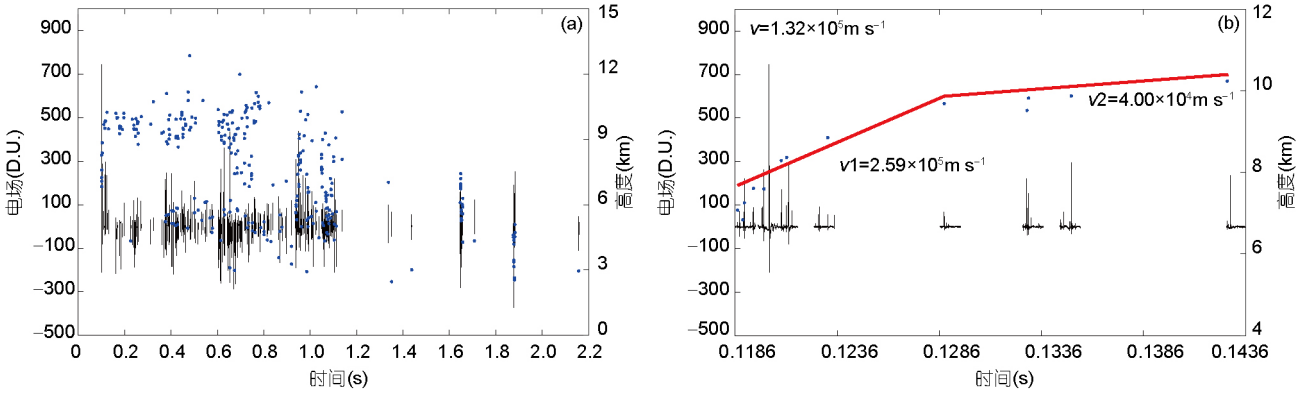


图 12　**云闪脉冲放电事件定位高度与GLC记录到的电场波形的叠加显示**

(a) 全过程叠加; (b) 前25ms放电过程叠加, 其中红色直线为定位位置高度随时间变化的拟合直线

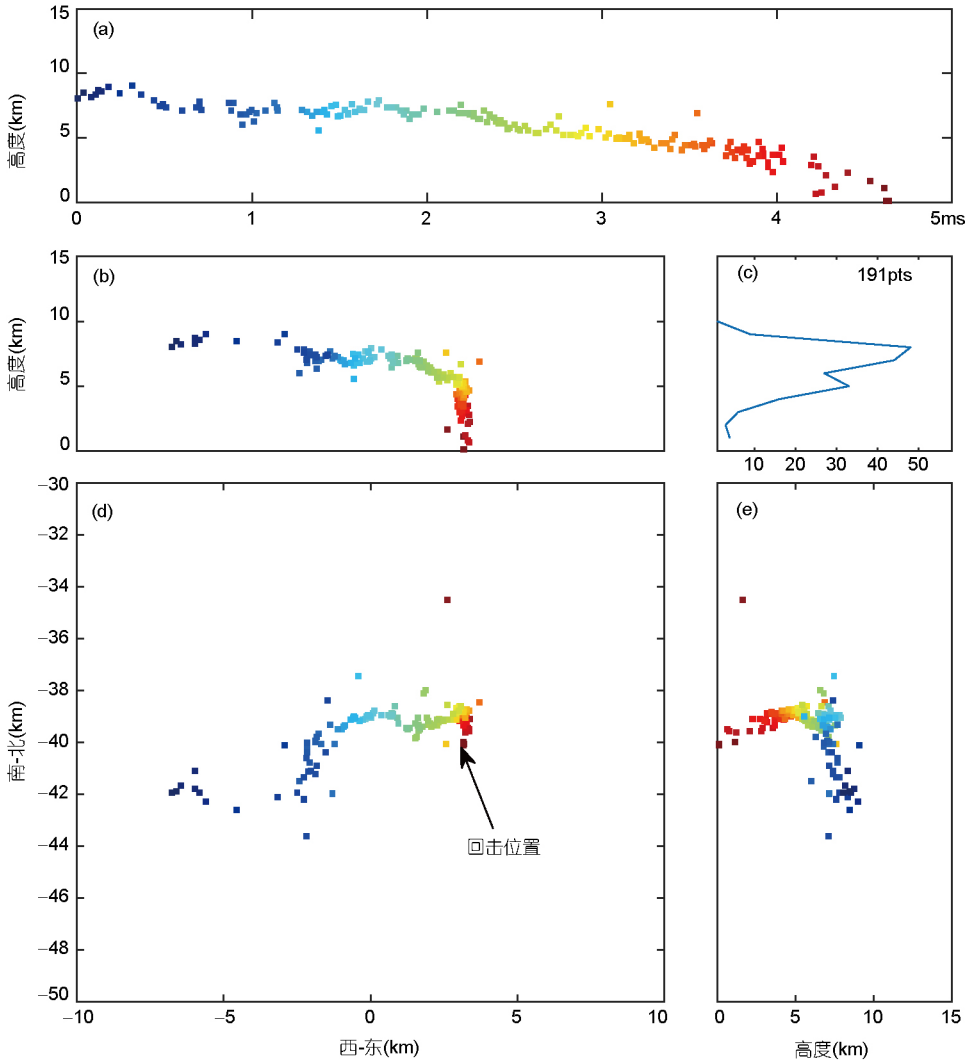


图 13　发生于2015年8月15日15时03分15秒地闪脉冲放电事件三维定位结果示意图

图例说明同图11

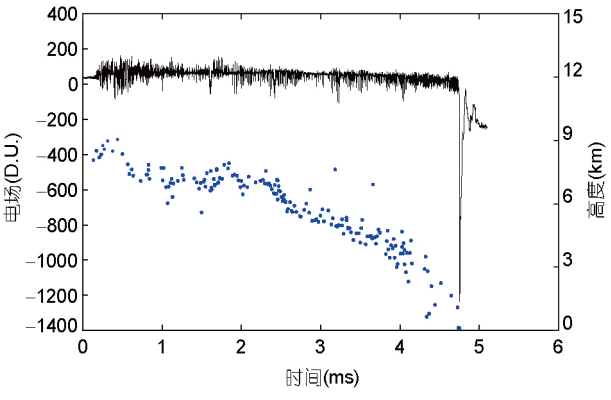


图 14　一次地闪先导回击过程对应的CHJ电场波形与定位高度随时间变化

电事件高度信息的CHJ电场波形. 从电场波形(图14)可知, 该次地闪回击为负极性, 先导通道由西南向东北发展(见图13d), 共成功定位191个脉冲放电事件, 详细描绘了地闪通道的三维发展状况. 该地闪先导初始定位高度位于8.1km, 经过约2ms后下降至7.3km, 二维垂直平均向下速度为6.79×10^{5}m s^{-1}, 因此图13a显示前2ms内高度呈现下降趋势. 随后脉冲放电事件迅速向下发展(图13b和13e), 二维垂直平均向下速度增大2.09×10^{6}m s^{-1}. 地闪下行先导在发展过程中速度呈现增大趋势. 该地闪下行先导垂直速度量级及变化趋势与之前的研究结果(Shao和Krehbiel, 1996; Yoshida等, 2014)一致. 最后, 地闪回击(图13d)落在先导通道的下

方, 定位高度为118m, 整个闪电先导-回击放电过程持续约5ms.

6 总结

于广州建设的LFEDA, 在160Hz~600kHz频段实现了闪电电场变化信号的分段连续采集, 发展了波形匹配、脉冲识别、脉冲匹配等方法, 基于GPS同步技术和时间到达差算法, 实现脉冲放电事件的高精度定位, 具备了对全部类型闪电放电过程进行三维定位的能力. 本文对LFEDA的组网配置、定位算法等进行了介绍, 并分析了LFEDA的定位性能, 基于对雷暴过程中闪电活动和云闪、地闪个例定位结果的分析, 初步指出了LFEDA数据可能的应用前景, 主要得到如下结论:

(1) LFEDA空间定位精度的蒙特卡罗模拟结果表明, 不同高度脉冲放电事件的平面定位误差相差微小, 但高度定位误差随着理想脉冲放电事件设定高度的增加而减少. 长基线分别改善垂直于阵列方向的水平定位精度和沿着阵列方向的高度定位精度. 基于人工触发闪电试验对LFEDA定位性能的客观评估表明, LFEDA对闪电事件和回击的探测效率分别为100%和95%, 回击平面定位误差平均值为102m. 在信号传播方向上的起伏地形可能造成信号的延迟, 影响定位精度.

(2) 平面位置上, LFEDA得到的脉冲放电事件位置变化能很好地反映雷暴移动路径. 垂直方向上, 脉冲放电事件与反射率柱所表征的对流区域有较强的一致性. 这表明LFEDA系统在雷暴监测、雷电预警、雷暴电学研究方面具有潜在应用价值.

(3) LFEDA对闪电放电过程具有描述能力. 一次云闪个例分析发现, 其始发于高度约7km的中部负电荷区, 初始放电阶段表现为明显的向上发展, 垂直方向平均速度是1.32×10^5m s^{-1}, 约25ms后到达高度约10.2km的上部正电荷区. 随后放电过程集中在低层5km和高层10km的电荷区, 以水平方向传输为主. 负极性地闪始发于8.1km, 先导向下发展过程中, 垂直平均速度由6.79×10^5m s^{-1}发展至2.09×10^6m s^{-1}, 平均发展速度呈现增大的趋势. 这些结果表明, LFEDA的定位结果可以用于闪电放电物理过程的分析, 特别是结合LFEDA的原始观测波形信息, 可服务于对闪电发展、传播特征所开展的研究.

LFEDA的三维信息可以大大提高对闪电放电信息的获取能力, 比如可获取闪电初始发展的位置、方向、速度等信息, 闪电发展传播的尺度等信息, 这些多维度的闪电信息不仅对于理解闪电放电的物理过程有重要作用, 而且与雷暴结构相结合, 可以有效扩展雷暴电学的研究领域, 克服之前国内大部分研究仅利用地闪(占总闪30%左右)二维位置、闪电放电频次等信息所具有的局限性, 从而提升闪电资料在灾害天气监测、预警、预报中的应用水平和能力. 这既是我们发展LFEDA的目的所在, 也是下一步LFEDA数据研究和应用工作的重要方向.

参考文献

王东方, 郄秀书, 袁铁, 张广庶, 张彤, 张廷龙, 张其林. 2009. 利用快电场变化脉冲定位进行云闪初始放电过程的研究. 气象学报, 67: 165–174

张广庶, 王彦辉, 郄秀书, 张彤, 赵玉祥, 李亚珺, 曹冬杰. 2010. 基于时差法三维定位系统对闪电放电过程的观测研究. 中国科学: 地球科学, 40: 523–534

张广庶, 李亚珺, 王彦辉, 张彤, 武斌, 刘妍秀. 2015. 闪电VHF辐射源三维定位网络测量精度的实验研究. 中国科学: 地球科学, 45: 1537–1552

张其林, 张源源, 李东帅, 樊艳峰, 高金阁. 2013. 地形地表的不规则起伏对雷电电磁场传输的影响. 气象学报, 71: 357–365

张义军, 孟青, 马明, 董万胜, 吕伟涛. 2006. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报, 17: 611–620

Bevington P. 1969. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. New York: McGraw-Hill. 5–214

Bitzer P M, Christian H J, Stewart M, Burchfield J, Podgorny S, Corredor D, Hall J, Kuznetsov E, Franklin V. 2013. Characterization and applications of VLF/LF source locations from lightning using the Huntsville Alabama Marx Meter Array. J Geophys Res-Atmos, 118: 3120–3138

Cecil D J, Buechler D E, Blakeslee R J. 2014. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. Atmos Res, 135-136: 404–414

Chen L W, Zhang Y J, Lu W T, Zheng D, Zhang Y, Chen S D, Huang Z H. 2012. Performance evaluation for a lightning location system based on observations of artificially triggered lightning and natural lightning flashes. J Atmos Ocean Technol, 29: 1835–1844

Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, Hiscox W L, Pyle R B, Pifer A E. 1998. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. national lightning detection network. J Geophys Res, 103: 9035–9044

Cummins K L, Murphy M J. 2009. An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at

the U.S. NLDN. IEEE Trans Electromagn Compat, 51: 499–518

Honma N, Suzuki F, Miyake Y, Ishii M, Hidayat S. 1998. Propagation effect on field waveforms in relation to time-of-arrival technique in lightning location. J Geophys Res, 103: 14141–14145

Karunarathne S, Marshall T C, Stolzenburg M, Karunarathna N, Vickers L E, Warner T A, Orville R E. 2013. Locating initial breakdown pulses using electric field change network. J Geophys Res-Atmos, 118: 7129–7141

Koshak W J, Solakiewicz R J, Blakeslee R J, Goodman S J, Christian H J, Hall J M, Bailey J C, Krider E P, Bateman M G, Boccippio D J, Mach D M, McCaul E W, Stewart M F, Buechler D E, Petersen W A, Cecil D J. 2004. North Alabama lightning mapping array (LMA): VHF source retrieval algorithm and error analyses. J Atmos Ocean Technol, 21: 543–558

Krehbiel P R, Brook M, McCrory R A. 1979. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. J Geophys Res, 84: 2432–2456

Li D, Azadifar M, Rachidi F, Rubinstein M, Diendorfer G, Sheshyekani K, Zhang Q, Wang Z. 2016. Analysis of lightning electromagnetic field propagation in mountainous terrain and its effects on ToA-based lightning location systems. J Geophys Res-Atmos, 121: 895–911

Shao X M, Krehbiel P R. 1996. The spatial and temporal development of intracloud lightning. J Geophys Res, 101: 26641–26668

Shao X M, Stanley M, Regan A, Harlin J, Pongratz M, Stock M. 2006. Total lightning observations with the new and improved Los Alamos Sferic Array (LASA). J Atmos Ocean Technol, 23: 1273–1288

Smith D A, Eack K B, Harlin J, Heavner M J, Jacobson A R, Massey R S, Shao X M, Wiens K C. 2002. The Los Alamos Sferic Array: A research tool for lightning investigations. J Geophys Res, 107: 4183

Thomas C, Garnero E J, Lay T. 2004. High-resolution imaging of low-ermost mantle structure under the Cocos plate. J Geophys Res, 109: 1149–1165

Wang Y, Qie X S, Wang D F, Liu M, Su D, Wang Z, Liu D, Wu Z, Sun Z, Tian Y. 2015. Beijing Lightning Network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes. Atmos Res, 171: 121–132

Wu T, Yoshida S, Akiyama Y, Stock M, Ushio T, Kawasaki Z. 2015. Preliminary breakdown of intracloud lightning: Initiation altitude, propagation speed, pulse train characteristics, and step length estimation. J Geophys Res-Atmos, 120: 9071–9086

Xia R, Zhang D L, Wang B. 2015. A 6-yr cloud-to-ground lightning climatology and its relationship to rainfall over Central and Eastern China. J Appl Meteorol Climatol, 54: 2443–2460

Yoshida S, Wu T, Ushio T, Kusunoki K, Nakamura Y. 2014. Initial results of LF sensor network for lightning observation and characteristics of lightning emission in LF band. J Geophys Res-Atmos, 119: 12,034–12,051

Zheng D, Zhang Y J, Lu W T, Zhang Y, Dong W, Chen S, Dan J. 2013. Characteristics of return stroke currents of classical and altitude triggered lightning in GCOELD in China. Atmos Res, 129–130: 67–78