

王东方, 孙竹玲, 袁善锋, 等. 2020. 北京多频段闪电三维定位网及一次雷暴过程的闪电时空演化特征 [J]. 大气科学, 44(4): 851–864. WANG Dongfang, SUN Zhuling, YUAN Shanfeng, et al. 2020. Beijing Broadband Lightning NETwork and the Spatiotemporal Evolution of Lightning Flashes during a Thunderstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 851–864. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.19161

北京多频段闪电三维定位网及一次雷暴过程的 闪电时空演化特征

王东方^{1,2} 孙竹玲¹ 袁善锋^{1,2} 卢晶雨^{1,2} 郅秀书^{1,2}
刘明远^{1,2} 徐燕³ 陆高鹏¹ 田野⁴

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3 江西省人工影响天气领导小组办公室, 南昌 330096

4 北京市气象局气象探测中心, 北京 100089

摘 要 北京多频段闪电三维定位网 (Beijing Broadband Lightning NETwork, 简称 BLNET) 是一个研究和业务相结合的区域性全闪三维定位网。2015 年, 对 BLNET 硬件、站网布局及定位算法等方面进行了更新升级, 提高了传感器的灵敏度, 提升了软件的运算效率和站网的探测性能。升级后的 BLNET 不仅具备了对云闪、地闪脉冲类型的快速识别和电流峰值估算等功能, 也实现了对闪电辐射源脉冲的三维实时定位, 以及通道可分辨的闪电放电过程精细定位。对 2017 年 7 月 7 日一次雷暴过程的闪电辐射源脉冲实时三维定位结果分析表明, 这次雷暴过程一共观测到 11902 次闪电, 以云闪为主, 地闪占总闪的 28%, 正地闪较少, 仅占总地闪的 5%, 在雷暴成熟期, 最大闪电频数高达 $927 \text{ flashes (6 min)}^{-1}$ 。通过对比分析闪电辐射源位置 and 对应时刻的雷达回波, 发现辐射源基本集中在强回波范围内。对一次正地闪的精细定位表明, 该正地闪初始阶段表现出明显的预击穿过程, 闪电辐射源的始发位置位于海拔高度约 5.4 km, 随后通道向上发展, 在约 10 km 高度, 通道开始沿着水平发展。对一次负地闪的精细定位表明, 初始阶段放电首先从约 7.1 km 高度处始发, 通道向南水平发展, 同时部分负先导分支向下发展, 约 38 ms 后, 通道短暂停止发展, 17 ms 后, 通道始发处重新激发。以上结果表明, BLNET 不仅具备对整个雷暴生命史闪电活动的三维实时定位和监测, 而且可以实现对闪电三维放电通道的精细定位。

关键词 闪电三维定位 BLNET (Beijing Broadband Lightning NETwork) 雷暴

文章编号 1006-9895(2020)04-0851-14

中图分类号 P411

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.19161

Beijing Broadband Lightning NETwork and the Spatiotemporal Evolution of Lightning Flashes during a Thunderstorm

WANG Dongfang^{1,2}, SUN Zhuling¹, YUAN Shanfeng^{1,2}, LU Jingyu^{1,2}, QIE Xiushu^{1,2},
LIU Mingyuan^{1,2}, XU Yan³, LU Gaopeng¹, and TIAN Ye⁴

¹ Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2019-05-23; 网络预出版日期 2019-11-04

作者简介 王东方, 男, 1980 年出生, 高级工程师, 主要从事大气电学研究。E-mail: wangdf@mail.iap.ac.cn

通讯作者 孙竹玲, E-mail: sunzhuling@gmail.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41630425、41875008, 国际 (地区) 合作与交流项目 41761144074

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41630425, 41875008), International (Regional) Cooperation and Exchange Project (Grant 41761144074)

2 School of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Jiangxi Provincial Artificial Weather Leading Group Office, Nanchang 330096

4 Meteorological Observation Center of Beijing Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract The Beijing Broadband Lightning NETwork (BLNET) is a regional total flashes 3D (three-dimensional) location network that combines research and business. In 2015, the BLNET hardware, station network layout, and location algorithm were updated and upgraded to improve the sensitivity of the sensor and improve computational efficiency and detection performance. BLNET features the functions of IC (Intra-Cloud) flashes, CG (Cloud-to-Ground) flash-pulse-type identification, and current peak estimation, as well as 3D real-time location of lightning radiation pulses and the fine location of the channel-resolvable lightning discharge process. The analysis of the real-time 3D location results for the lightning radiation source pulse during the thunderstorm that occurred on 7 July 2017 shows a total of 11,902 lightning flashes during the thunderstorm process. Most of these flashes were dominated by IC flashes, with CG flashes accounting for just 28% of the total. PCG (Positive Cloud-to-Ground) flashes account for only 5% of the total number of CG flashes. During the mature period of the thunderstorm, the maximum lightning frequency was $927 \text{ flashes (6 min)}^{-1}$. By comparing and analyzing the location of the lightning radiation source and the radar echo at the corresponding time, the radiation source was found to be basically concentrated in the strong echo range. The fine location results of the PCG flashes indicate that the initial stage involved a clear pre-breakdown process. The origin of the lightning radiation source was about 5.4 km above sea level, and then the channel developed upward. At about 10 km, the channel began to exhibit a horizontal development. The fine location results of the NCG (Negative Cloud-to-Ground) flashes indicate that the discharge first originated from a height of about 7.1 km, then the channel developed to the south, and some negative pilot branches developed downward. After about 38 ms, the channel stopped developing for a short time. After 17 ms, the channel development began again and the air was re-energized. The above results show that BLNET can locate and monitor 3D real-time lightning activity of the whole thunderstorm life history, as well as obtain the fine location of the lightning 3D discharge channel.

Keywords Three-dimensional lightning location, BLNET (Beijing Broadband Lightning NETwork), Thunderstorm

1 引言

高精度的闪电定位系统是闪电监测和研究的重要手段之一, 近几十年来日趋完善。雷电放电过程通常产生频谱范围很宽的电磁波, 大部分能量集中在 300 MHz 以下。因此, 针对闪电放电辐射的不同频段电磁波, 设计专门的仪器进行探测, 利用多个传感器组网进行同步观测, 并通过发展物理模型和定位算法, 可实现对闪电的定位。

国际上, 比较有代表性并具有业务功能的闪电定位系统是美国国家闪电定位网 NLDN (National Lightning Detection Network)。自从 20 世纪 90 年代商业运行以来, NLDN 已经升级了两次 (Jerauld et al., 2005; Cummins et al., 2006; Biagi et al., 2007)。另外, 还有美国 Los Alamos 实验室开发的闪电定位网 LASA (Los Alamos Seferic Array) (Shao et al., 2006)、欧洲发展的实验性长距雷电探测系统 (ZEUS) 和德国慕尼黑大学开发的欧洲闪电定位网 LINET (Lightning Network) (Chronis and

Anagnostou, 2003, 2006; Lagouvardos et al., 2009; Betz et al., 2009) 等。除了业务化的闪电定位系统, 近几十年来, 也涌现了许多优秀的能描述闪电发展通道的闪电定位系统, 如闪电探测和测距系统 LDAR (Lightning Detection and Ranging) (Uman et al., 1978; Poehler and Lennon, 1979; Lhermitte and Krehbiel, 1979; Maier et al., 1995) 以及甚高频 (VHF) 闪电图示系统 LMA (Lightning Mapping Array) (Rison et al., 1999; Krehbiel et al., 2000; Hamlin, 2004; Thomas et al., 2004) 等。

目前国内具有业务功能的地基闪电探测网有中国气象局的地闪定位网 (ADTD)、国家电网的地闪定位网等。由于闪电具有随机性和瞬时性的特点, 对闪电的科学认识很大程度上依赖于高时空精度的探测手段。除了业务型的区域性闪电定位系统, 近年来国内也发展了许多具有三维定位功能的研究型闪电定位网。如国内 Zhang et al. (2010) 发展了类似 LMA 的闪电 VHF 辐射源三维定位系统 LLR (3D Location System of Lightning VHF Radiation

Pulses), 可以获得雷暴云中的闪电辐射源三维时空发展物理图像 (Li et al., 2012, 2013)。Wu et al. (2016) 利用 LLR 获得的闪电资料研究了闪电放电初始预击穿过程。Fan et al. (2018) 发展了低频电场探测阵列 LFEDA (low-frequency electric field detection array)。刘恒毅等 (2019) 在重庆发展了一套双频段三维全闪电定位系统。Sun et al. (2013) 开发了 VHF 干涉仪定位系统, 并对一次人工触发闪电的发展过程进行了研究。

北京多频段闪电三维定位网 (BLNET) 从 2008 年开始建设, 但由于京津冀地区复杂的电磁环境干扰, 早期的运行状态并不理想, 一直到 2013 年探测网络初步形成。王宇等 (2015) 曾介绍 BLNET 的网络构成与初步定位结果, 并通过对 2013 年一次雷暴过程的闪电二维定位结果和对应时次的雷达回波进行比较, 证明了探测网络和定位方法的可靠性。之后 BLNET 实现了对闪电辐射源的三维定位 (Wang et al., 2016; 徐燕等, 2018; 孙凌等, 2019; 孙萌宇等, 2020), 但是由于无线电背景干扰问题, 对一次闪电的定位点数较少。Srivastava et al. (2017) 对其二维定位结果进行了评估, 认为 BLNET 的全闪探测效率为 93.2%, 对地闪探测效率为 73.9%。在此基础上, 近年来, 进一步对 BLNET 进行了硬件升级和算法改进, 实现了对雷电的高时空分辨率探测和实时定位, 不仅可为雷电的监测、预警提供重要的技术支撑, 也可以进行雷电放电通道的三维精细定位, 为雷电物理和雷害机制研究提供资料基础。下面首先简要介绍一下 BLNET 目前的站网布局、硬件构成和算法, 然后利用实时闪电三维定位资料对一次雷暴过程整个生命史的闪电活动进行分析, 最后结合个例分析, 尤其是地闪放电过程的三维精细定位, 来说明闪电放电通道的发展过程和 BLNET 的探测性能。

2 仪器介绍

2015 年, BLNET 在硬件、站网布局及定位算法等方面进行了重大升级和改进, 不仅实现了对雷暴过程的云闪和地闪辐射源脉冲的全闪三维实时定位, 而且可以精细描述闪电的放电通道结构。

2.1 BLNET 站网布局及系统硬件

图 1 给出了 BLNET 当前的测站分布和传感器配置。每个测站根据观测需要配备不同的传感器, 主要有: 快天线、慢天线、磁天线以及甚高频传感

器。2015 年 BLNET 在原来测站基础上, 在北京密云县东北部新增了上甸子站 (SDZ), 形成了由 16 个测站组成的大网套小网格局。同时, 至少每个测站配备 3 套及以上的不同参量传感器, 个别测站配备 4 套传感器 (图 1b 中的红色三角形)。另外, 在站网最外围的 5 个测站新增了磁场测量。BLNET 配置的 4 套传感器针对闪电不同的放电子过程进行探测, 甚高频系统的中心频率 72 MHz, 带宽 6 MHz; 快天线、慢天线的工作频段均为 1.5 kHz~1.5 MHz, 时间常数分别为 0.1 ms、2 ms; 磁场测量系统的探测频段为 3 kHz~300 kHz。因此, 目前的测站配置可实现对闪电的宽频段多参量同步探测和记录。

为定性了解 BLNET 升级后的误差分布, 利用蒙特卡罗法 (Mente Carlo) 进行仿真模拟。模拟区域设定在以中国科学院大气物理研究所 (简称大气所, IAP) 为中心的 150 km×150 km 范围, 网格大小为 3 km×3 km, 垂直方向取三个高度层 (地

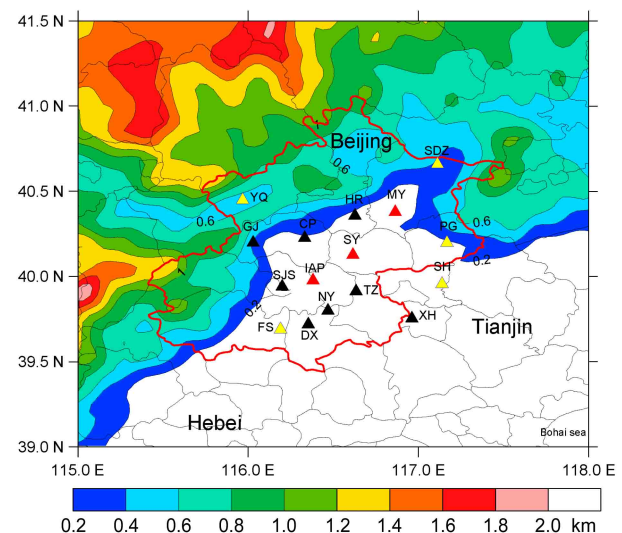


图 1 北京多频段闪电三维定位网 (BLNET) 的测站分布。三角形代表测站位置 (红色三角形表示有快天线、慢天线、磁天线和甚高频天线 4 个传感器; 黑色三角形表示有快天线、慢天线和甚高频天线 3 个传感器; 蓝色三角形表示有快天线、慢天线和磁天线 3 个传感器)。彩色阴影代表海拔高度

Fig. 1 Distribution of BLNET (Beijing Broadband Lightning Network) stations. The triangles represent the positions of stations. The red triangles indicate that there are 4 sensors (fast antenna, slow antenna, magnetic antenna, and VHF antenna); the black triangles indicate that there are 3 sensors (fast antenna, slow antenna, and VHF antenna); the blue triangles indicate that there are 3 sensors (fast antenna, slow antenna, and Magnetic antenna). Color shadings represent altitude

面、5 km、10 km)。将辐射源置于每个网格点上,计算它们辐射的电磁波到达各观测站的时间,然后在此时间上叠加均值为零,标准差为 Δt 的高斯随机噪声,最后利用算法反算辐射源的位置,通过和网格点的位置比较得到理论的定位误差。假定 BLNET 的时间测量误差服从高斯分布,均值为 0,标准差 Δt 为 0.4 μs ,并且假定所有的测站都能同时测量到闪电信号。图 2a-c 分别给出三个高度层上 BLNET 升级后的水平定位误差的分布,对比王宇等(2015)可知,新增上甸子测站后,站网覆盖范围内的定位误差明显减小,定位误差小于 200 m、400 m 和 600 m 的低值范围都大大增加,值得注意的是,BLNET 北部的定位误差得到了明显改善。

以上的定位误差理论仿真的前提是 16 个测站都能测量到同一个辐射源的信息,因此,得到的定位误差是一个理想的效果。在实际的观测过程中,可能只有部分测站探测到同一个闪电电磁信号,实际的定位误差可能会随参与计算的站点数量的减小而增大。评估闪电定位系统实际定位误差最直接有效的办法是对比分析击中地面固定建筑物和闪电定位结果(Wang et al., 2016)。本节主要利用击中大气所 325 m 气象铁塔(39.9743°N, 116.3712°E)及其周围高建筑物的光学资料讨论 BLNET 的实际定位误差。2014~2018 年期间,高速摄像观测到了 14 次击中大气所气象塔及周围高建筑物的负地闪回击,结果表明, BLNET 的最大定位误差 1351 m,最小定位误差 20 m,平均定位误差 452 m。值得指出的是,2017 年 8 月 11 日 04:01:03(北京时,下同)高速摄像观测到了一次击中大气所气象铁塔的地闪,这次地闪同时被 9 个测站探测到。对该次闪电一次继后回击采用不同测站的组合方式进行定位发现,随着参与定位测站数目的增多,定位误差存在明显减小的趋势,其中全部 9 站参与定位的结果与实际位置偏差约 20 m。

一方面, BLNET 除了不断优化站网布局,新增观测子站;另一方面,也对系统硬件进行更新升级。图 3 给出了 BLNET 单站硬件构成,沿用了原来的系统总体架构, BLNET 单站的硬件系统主要由四大部分组成,分别是信号接收端、信号处理、数据采集以及波形的显示和数据存储。升级后的 BLNET 新增了磁场测量,数据采集方式由之前的单一采集系统增加到两套(图 3 中红色椭圆所示),同时也对快天线、慢天线传感器的电路设计进行了

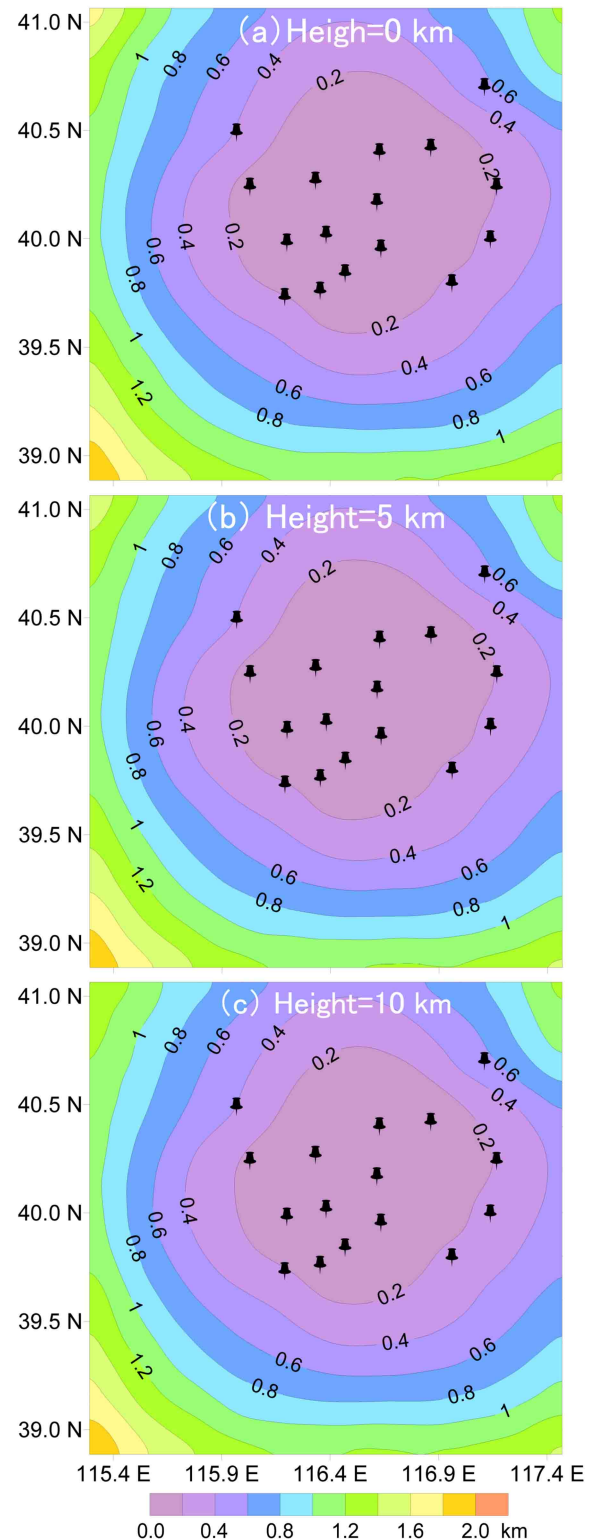


图 2 利用蒙特卡罗法模拟 BLNET 升级后辐射源高度为 (a) 0 km、(b) 5 km 和 (c) 10 km 的水平定位误差 (单位: km)。图中黑色钉子代表 BLNET 观测站

Fig. 2 Radiation source horizontal location error (units: km) simulated by the Monte Carlo method after the BLNET upgrade at (a) 0 km, (b) 5 km, and (c) 10 km altitude. Black pins indicate BLNET stations

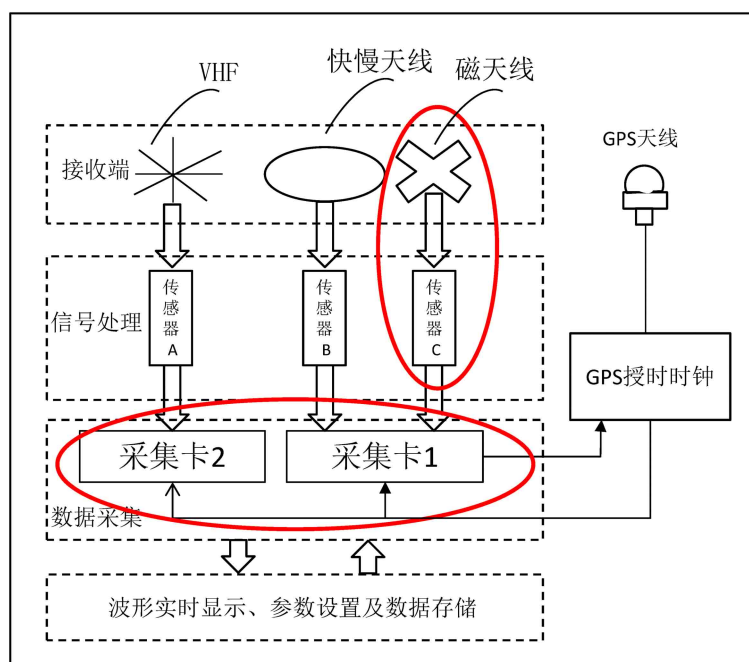


图3 BLNET 升级后单站硬件系统构成图示

Fig. 3 Block diagram of hardware system composition at single station after the BLNET upgrade

优化和调整,提高了传感器的抗干扰能力。

数据采集方面,采用双卡并行运行模式替代之前的单卡运行模式。由于不同信号的采样率不同,为满足对甚高频包络信号的采集,采集板卡的采样率需设置为 15 MSPS (Mega-Samples Per Second),但是对于快天线、慢天线和磁天线的探测频段,此采样率的设置偏高。以前的 BLNET 为了同时采集三路信号,对快天线、慢天线的两路信号进行降采样的操作。这样做的弊端是会降低板卡的采样速率,死时间延长。当闪电频发时,会遗漏一些闪电。因此,为了能够同时对所有信号同步采集,且尽可能地减小数据量,降低系统死时间,新的 BLNET 系统采用了双卡并行采集模式。

根据观测的需要, BLNET 部分测站新增了具有很好闪电探测能力的低频磁天线。Lu et al. (2014) 早期利用低频磁场传感器对闪电开展了相关工作,结果表明,低频磁场测量灵敏度很高,能探测到较弱的闪电放电过程。Zhang et al. (2016) 和樊艳峰等 (2017) 曾分别利用磁场遥感方法对双极性窄脉事件和人工引雷中的初始连续电流进行了反演,取得了较好的效果。快天线、慢天线和甚高频系统的基本工作原理参见王东方等 (2009, 2020)、曹冬杰等 (2011) 和王宇等 (2015)。

传感器电路设计方面,更新升级后的 BLNET

对快天线、慢天线传感器电路进行了重新优化和设计,减小了电路分布参数。同时,为确保能在大城市复杂电磁环境下工作,设计了滤波电路,有效提高了系统的抗干扰能力和数据质量,并减少了电源扰动对信号的干扰。

2.2 BLNET 的功能升级

除了硬件系统的改进, BLNET 也对软件架构进行升级,新增云闪、地闪脉冲放电类型的识别、回击电流峰值的估算等功能。相对云闪脉冲,由于地闪回击脉冲的波形特征独特,且对地闪波形的研究较多,因而脉冲的波形识别主要是针对地闪回击电场脉冲进行识别。通过分析正、负极性脉冲波形的特征参数,识别出脉冲的类型。地闪脉冲波形特征的识别判据主要包括 12 个参数,如脉冲波形上升沿时间、下降沿时间、脉冲宽度以及回击脉冲的峰值点与回击前同一极性的脉冲的峰值点间的时间间隔等,各参数的量化是在大量历史资料统计基础上得到 (黎勋等, 2017),实际的脉冲波形识别中,根据探测的回击脉冲波形进行适当调整来提高识别准确率。由于存在单一测站识别有误的情况,因此, BLNET 综合考虑多个测站对同一脉冲的类型判断结果,最终确定脉冲的类型。

BLNET 增加的第二个功能是发展了一种估算地闪通道中回击峰值电流强度的方法。在各个测站

同步得到并识别出一次回击产生的电磁场信号后, 然后利用时间差法得到地闪回击的位置信息, 根据回击点与各测站间的距离计算得到该回击的峰值电流, 最终取各站点回击电流估算结果的平均值即是该回击的峰值电流强度。根据 Uman et al. (1975) 利用传输线模式对闪电回击电流电磁辐射场的时域推导结果, 回击峰值电流 I_P 的大小与探测仪测量得到的电场峰值强度 E_P 和回击电流的传播速度 v 遵循如下表达式:

$$I_P = \frac{2\pi D c^2 \epsilon_0}{v} E_{OP}, \quad (1)$$

其中, D 是探测仪到地闪回击接地点间的水平距离, c 为光速, ϵ_0 是真空介电常数, 一般假设回击电流在通道内的传播速度是固定值。这里的 E_{OP} 为回击产生的地面电场, 但实际情况中, 天线并不是都放置在地表面, 而且场地周围地形、建筑物等也会对电场造成畸变。因此, 假定畸变系数为 A , 则实际测量到的电场 E_P 为

$$E_P = A E_{OP}, \quad (2)$$

式中, A 为场地快天线架高引起的电场变化系数和环境因素引起的电场变化系数, 可以通过与放置在地面齐平且周围环境较开阔的快天线测量结果进行对比得到。

2.3 BLNET 实时定位

BLNET 不仅实现了硬件和软件的进一步升级, 而且实现了定位系统的实时业务化运行。通常情况下, 各测站采用快天线触发的方式进行多通道闪电数据的同步采集。由于数据量较大、带宽资源有限, 原始采集基数据的实时回传难以实现。因此, 发展了闪电基数据的本地化处理技术, 在各站进行闪电基数据本地快速寻峰、识别和压缩, 在保留关键信息基础上, 最大程度降低回传数据量大小, 提高数据回传效率。处理并保留的关键信息包括: 每个脉冲的到达时间、脉冲的幅值以及云、地闪脉冲识别结果。中心站每间隔一定时间自动进行一次实时的三维辐射脉冲源定位并绘图输出闪电产品。另外, 所有的闪电产品自动上传至中心站 FTP, 实现对北京及周边地区闪电活动的实时监测、预警。同时, 保留在基站的闪电基数据可以进行事后的更精细定位和研究。

目前 BLNET 实时定位主要利用快天线实时峰值信息, 下文将针对一次雷暴过程闪电辐射源进行三维定位并与对应雷达回波进行比较。另外, 利用快

天线的原始电场波形资料对闪电个例进行精细定位。

3 一次雷暴过程的闪电时空分布特征

2017 年 7 月 7 日, 北京及周边地区发生了一次强雷暴过程, 雷暴进入北京之前在张家口附近已经形成了强对流单体, 进入北京后在有利的气象条件下很快形成强爬线, 弓形结构明显。图 4 给出了这次雷暴过程整个生命史的总闪、地闪和正地闪每 6 min 闪电频数随时间的演变。这次雷暴过程一共探测到了 11902 次闪电, 以云闪为主, 占总闪的约 72%, 地闪占总闪的约 28%, 这次雷暴过程正地闪偏少, 仅占总地闪的约 5.3%。由图 4 可知, 20:36 以后, 闪电频数增加很快, 于 20:54 首次达到次峰值, 闪电频数约为 898 flashes (6 min)⁻¹, 随后闪电活动略微减弱, 但很快又活跃起来, 于 21:12 再次到达最大值, 总闪电频数为 927 flashes (6 min)⁻¹, 之后闪电活动逐渐减弱。总体趋势上, 这次雷暴过程地闪的变化和总闪的变化一致, 但是正地闪闪电频数在雷暴减弱阶段明显高于雷暴增强阶段。

BLNET 能够探测确定闪电辐射源的三维空间信息, 其高度信息有助于了解云中的电荷区域分布。图 5 给出了闪电辐射源密度随高度分布以及对应不同雷达回波面积随时间的变化。由图可知, 该雷暴过程的闪电辐射源高度主要集中在 3~12 km 之间, 其中辐射源高密度区集中在 5~9 km, 最大辐射源密度达到了 24 flashes km⁻¹。20:20 开始, 辐射源密度开始逐渐增多, 20:20~21:42 期间, 5~9 km 高度处出现了辐射源密度的高值区, 最大辐射源密度达到 24 flashes km⁻¹。另外, 由图中 30 dBZ、45 dBZ 和 50 dBZ 雷达回波顶高和 50 dBZ 面积随时间的变化可知, 辐射源密度高值区和 30 dBZ、45 dBZ 和 50 dBZ 雷达回波顶高具有很好的一致性, 在辐射源密度高值区, 对应的 30 dBZ 回波顶高位于 13~15 km 之间, 45 dBZ 回波顶高位于 10~13 km 之间, 50 dBZ 回波顶高位于 9~11 km 之间。辐射源密度高值区和大于 50 dBZ 雷达回波面积的变化在前期也有一定的一致性, 当辐射源密度值增多时, 大于 50 dBZ 雷达回波面积也增加; 并在辐射源达到最大值时, 大于 50 dBZ 雷达回波面积也达到最大; 但当 50 dBZ 雷达回波面积快速下降时, 辐射源密度和高度也开始缓慢下降, 直到二者都达到一个很小的值。

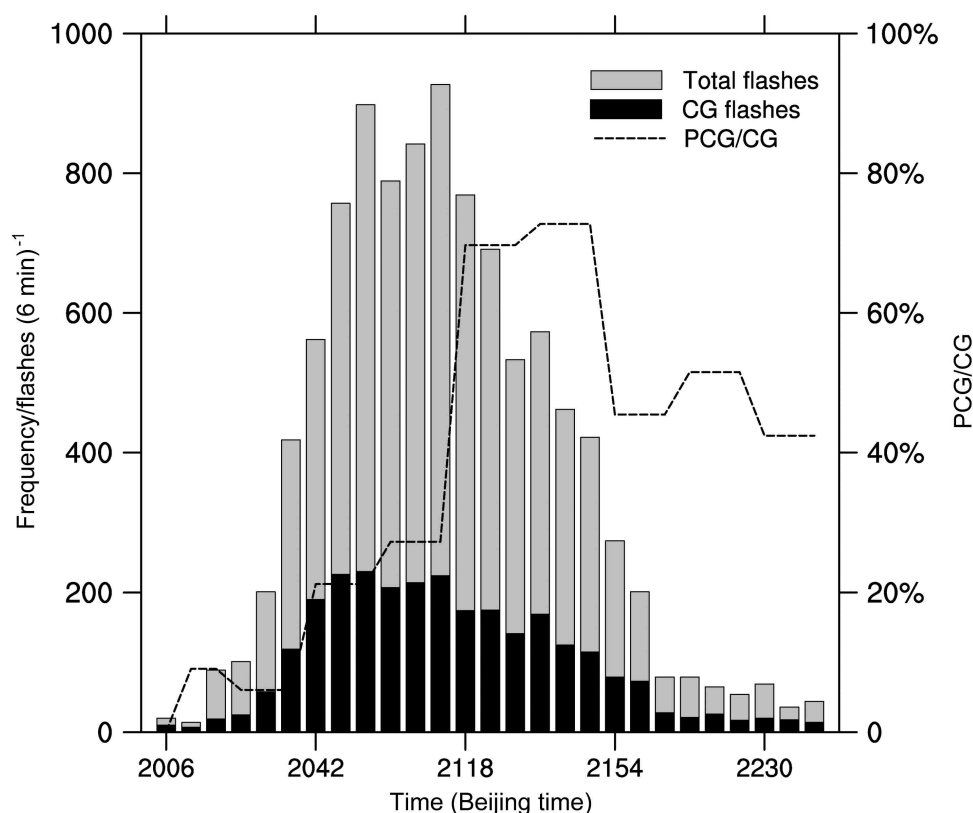


图 4 2017 年 7 月 7 日总闪、地闪的频数以及正地闪/地闪比例的演变特征。左边纵坐标：总闪、地闪的频数；右边纵坐标：正地闪/地闪的比例

Fig. 4 Evolution characteristics of the total flashes and CG (cloud-to-ground) flashes frequencies (left y-axis), and percentage of positive CG (PCG) flashes in CG flashes (PCG/CG, right y-axis) on 7 July 2017

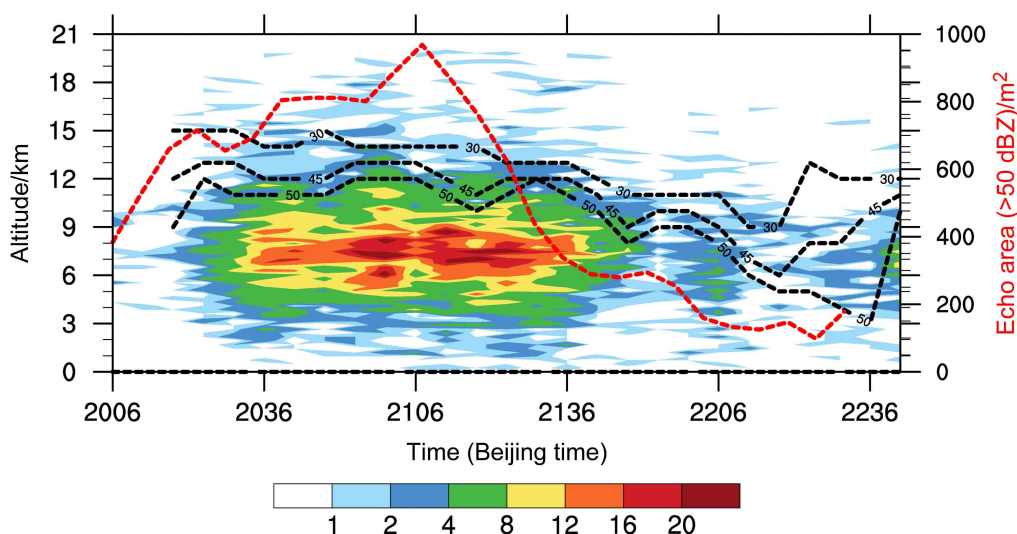


图 5 2017 年 7 月 7 日辐射源密度（彩色阴影）和不同强度（30 dBZ、45 dBZ、50 dBZ）雷达回波高度（黑色虚线，单位：km）及大于 50 dBZ 雷达回波面积（红色虚线，单位：m²）随时间的变化。左边纵坐标：海拔高度；右边纵坐标：大于 50 dBZ 雷达回波面积

Fig. 5 Evolutions of radar radiation source densities (color shadings), altitudes (black dashed lines, units: km) of radar echoes of different intensities (30 dBZ, 45 dBZ, 50 dBZ), and areas (red dashed line, units: m²) of radar echoes greater than 50 dBZ on 7 July 2017. The left y-axis represents altitudes; the right y-axis represents areas of radar echoes greater than 50 dBZ

图 6 给出了整个雷暴过程初始—成熟—消散三个阶段对应时段闪电辐射源和雷达回波的叠加。图

中的黑点代表定位的闪电辐射源，彩色代表 S 波段雷达的组合反射率因子。叠加的闪电辐射源为雷达

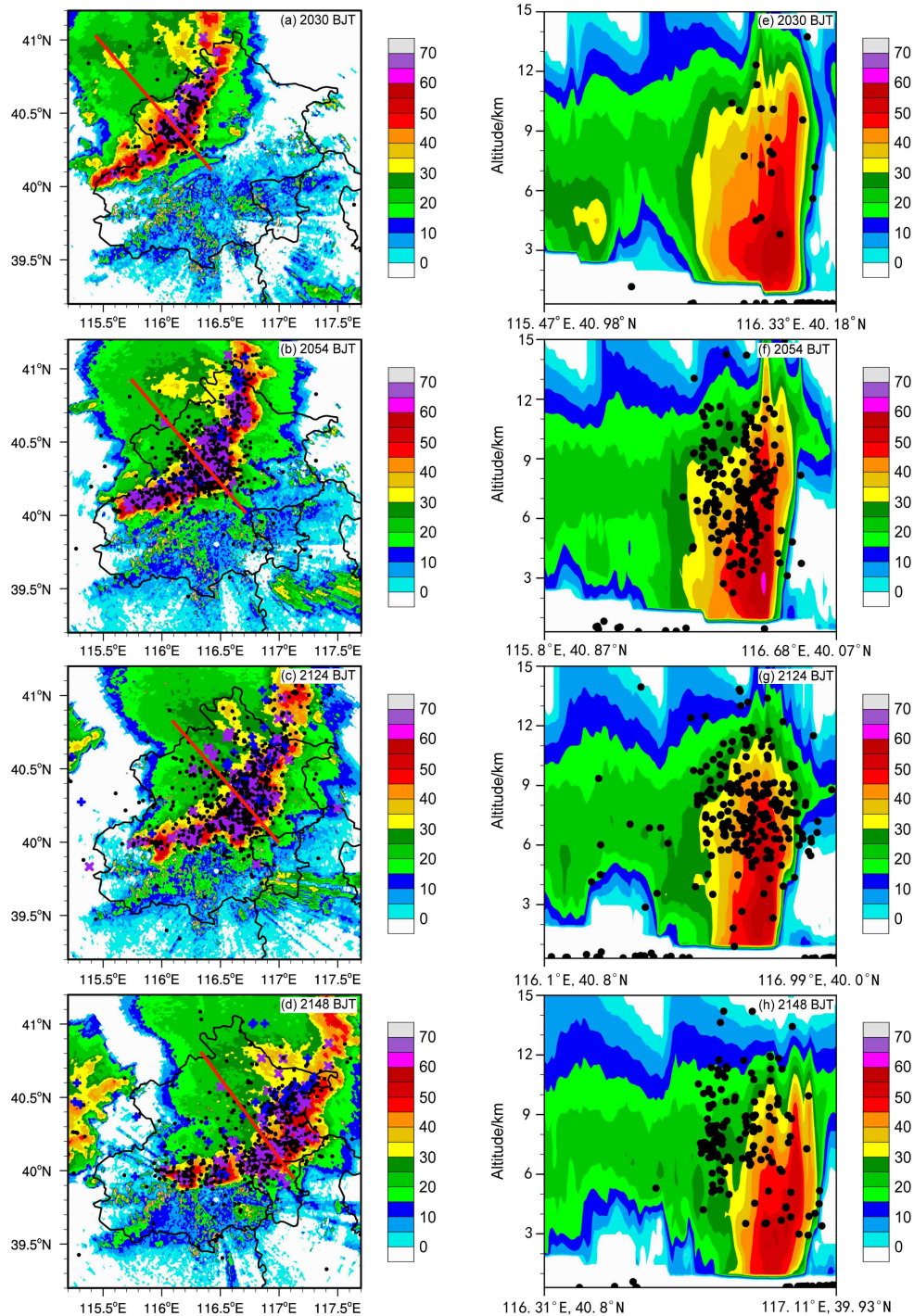


图 6 2017 年 7 月 7 日雷暴过程初始—成熟—消散三个阶段四个不同时刻 (20:30、20:54、21:24 和 21:48, 北京时间, 下同) 闪电辐射源定位结果和雷达回波 (单位: dBZ) 的叠加: (a–d) 水平分布; (e–h) 沿图 (a–d) 红色直线的剖面。黑色圈代表云闪辐射源, 蓝色加号代表正地闪辐射源, 粉紫色叉号代表负地闪辐射源

Fig. 6 The superpositions of lightning radiation source location results and radar echoes (units: dBZ) at four moments (2030 BJT, 2054 BJT, 2124 BJT, and 2148 BJT) for three stages (initial–mature–dissipated) of thunderstorm process on 7 July 2017: (a–d) Horizontal distribution; (e–h) cross sections along the red straight lines in Figs. a–d. The black dots represent the Intra-Cloud (IC) lightning flashes radiation source, the blue plus signs represent the PCG lightning flashes radiation source, and the pink purple crosses represent the NCG lightning flashes radiation source

回波对应时刻前 6 min 的定位结果。由图可知, 雷暴初始阶段 20:30, 闪电辐射源比较少, 只有少量的辐射源在对流区。随着雷暴发展成熟, 闪电辐射源不断增多, 且集中在回波强度为 45 dBZ 左右的对流塔区 (20:54~21:24)。雷暴的消散阶段 (21:48), 辐射源开始减少, 高度有所下降, 虽然有辐射源出现在强回波区, 但是大部分辐射源出现在层云区, 这与消散阶段发生的正地闪有关, 通常这一阶段发生的正地闪由对流区始发, 然后向层云区发展, 随后向下传播入地 (Lu et al., 2013)。通过不同时刻的闪电辐射源定位结果和雷达回波的对比发现, 闪电辐射源和雷达回波区具有很好的一

致性。这不仅证明了升级后的 BLNET 具有三维定位能力, 而且进一步证明了北京雷电三维定位网定位结果的合理性。

4 通道可分辨的闪电放电过程的三维精细定位

BLNET 不仅可以对整个雷暴过程的闪电辐射源脉冲进行实时三维定位, 而且可以事后对单次闪电放电过程进行精细定位。图 7 给出了一次正地闪放电通道的三维时空演变。该正地闪发生在 2017 年 7 月 7 日 23 时 25 分 08 秒, 由紧随上述飑线过

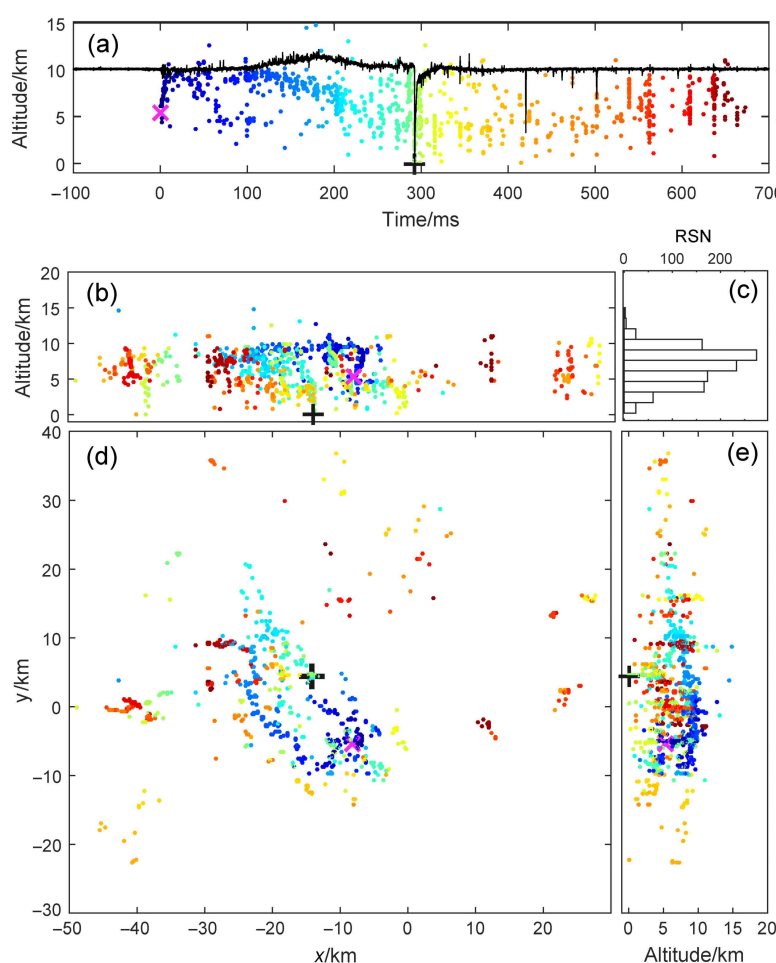


图 7 2017 年 7 月 7 日 23 时 25 分 08 秒的一次正地闪的三维结构图: (a) 闪电辐射源高度随时间的变化, 左侧纵坐标是海拔高度, 右侧纵坐标是电场变化的归一化值 (Normalized EFC); (b) 辐射源在南北方向上的立面投影; (c) 辐射源发生数目 (RSN) 随高度的分布; (d) 辐射源在平面的投影; (e) 辐射源在东西方向上的立面投影。图中 “ $\times$ ” 代表辐射源的始发高度, “ $+$ ” 代表正地闪打到地面对应的时刻

Fig. 7 3D (three-dimensional) structure mapping of PCG at 2325:08 BJT on 7 July 2017: (a) Evolutions of the lightning radiation source height with time, the left y-axis indicates the altitude, and the right y-axis indicates the normalized value of the electric field change (Normalized EFC); (b) projection of the radiation source in the north-south direction; (c) distributions of the radiation source numbers (RSN) with height; (d) projection of the radiation sources in the plane; (e) projection of the radiation source in the east-west direction. “ $\times$ ” represent the originating height of the radiation source, “ $+$ ” represent the moment of the PCG lightning flashing return stroke

程之后的第二次线状对流系统所产生。这次正地闪只有一次回击过程,持续时间约 680 ms,共探测到 1320 个辐射源,发生在距离探测网络中心西南约 16 km 处。由图 8 可知,本次闪电起始放电呈现出明显预击穿特征,对应闪电辐射源的始发位置距地面约 5.4 km 的高度,然后放电通道向上发展。根据电场变化极性判断,向上发展的放电为负极性的先导通道,发展到高度约 10 km 后,放电通道开始出现分叉,其中一个分叉朝中心测站西北方向发展,另外一个分叉沿着地表方向发展,对应放电较弱的正极性通道。闪电起始 292 ms 后,电场变化表现为正回击波形,回击点的位置距离闪电起始位置的垂直距离约为 11.7 km。回击峰值后探测到从地面向上发展的辐射源,对应于回击电流自下而上的传播,回击发生之后云内放电强烈,持续时间约 380 ms,水平覆盖范围较广,整个放电过程辐射源高度主要集中在 3.7~9.6 km。图 9 给出了这次正地闪辐射源和雷达回波的叠加图,可以看出正地闪的辐射源首先从强对流区始发,初始击穿的负先导垂直向上发展,转为水平后倾斜往层状云区发展,正地闪的回击点位置正上方对应层状云区。这个例子很好地说明了发生在层状云区的正地闪,起始过程可以发生在对流区,通过水平发展的负先导通道到达层状云区,负先导通道在层状云区的大范围发展会中和大量的云中正电荷,有利于中高层瞬态发光现象(如红色精灵)以及地面高建筑上行闪电的发生。

BLNET 不仅能对正地闪进行详细的描绘,也可以对负地闪进行精细刻画。图 10 给出了发生在 2017 年 7 月 14 日 18 时 35 分 25 秒的一次单回击负地闪的定位结果。由图可知,辐射源起始于较高高度,约 7.1 km,但其持续时间相对上文的正地闪

短很多(约 175 ms)。放电过程始发之后通道向地面偏南方向发展,发展约 37 ms 后放电通道短暂停止,此时向南发展的闪电通道长度约为 4 km。约 12 ms 后通道重新激发,负先导通道开始快速垂直向下发展,随后电场波形表现为明显的负极性回击波形,之后辐射源数目明显减少,回击之后约 90 ms 时间内,仍能探测到零星云内放电过程,主要位于 4~8 km 高度。

综上所述,从对整个雷暴过程的闪电三维定位结果与雷达资料的对比以及闪电个例的定位结果表明, BLNET 不仅可以利用闪电辐射源的高度和发生频率来监测整个雷暴生命史的发展演变过程,而且也可以精细刻画单次闪电放电通道结构的发展演变过程。

5 结论和讨论

本文详细介绍了更新升级后的 BLNET 的测站布局、设备构成和探测能力等,利用蒙特卡罗模拟方法,对 BLNET 的定位误差进行了理论仿真,并利用高塔闪电对其实际定位误差进行了检验。同时,利用 BLNET 实时三维定位资料,分析了 2017 年 7 月 7 日一次爬线过程的闪电时空演化,并结合两个地闪个例进行了通道可分辨的闪电三维精细定位,得到以下结论:

(1) 升级后的 BLNET 部分测站新增了磁场测量,具备了云闪、地闪脉冲类型识别和脉冲电流峰值估算等功能, BLNET 还发展了大容量闪电基数据的本地化快速处理技术,实现了闪电数据的存储、分析、传输及定位的一体化流程,实现了闪电数据的实时定位及对外发布。这不仅满足了雷电预警预报业务的需求,而且存留在子站的闪电基数据可供事后的深入分析和研究。

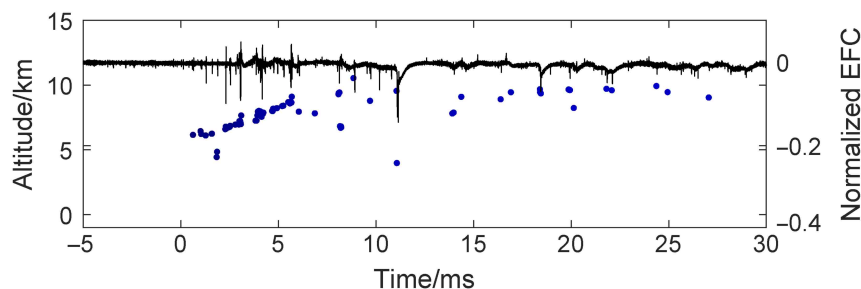


图 8 2017 年 7 月 7 日 23 时 25 分 08 秒正地闪的预击穿过程。左侧纵坐标是海拔高度,右侧纵坐标是电场变化的归一化值

Fig. 8 The pre-breakdown process of the PCG lightning flashes occurring at 2325:08 BJT on 7 July 2017. The left y-axis indicates the altitude, and the right y-axis indicates the normalized value of the electric field change (Normalized EFC)

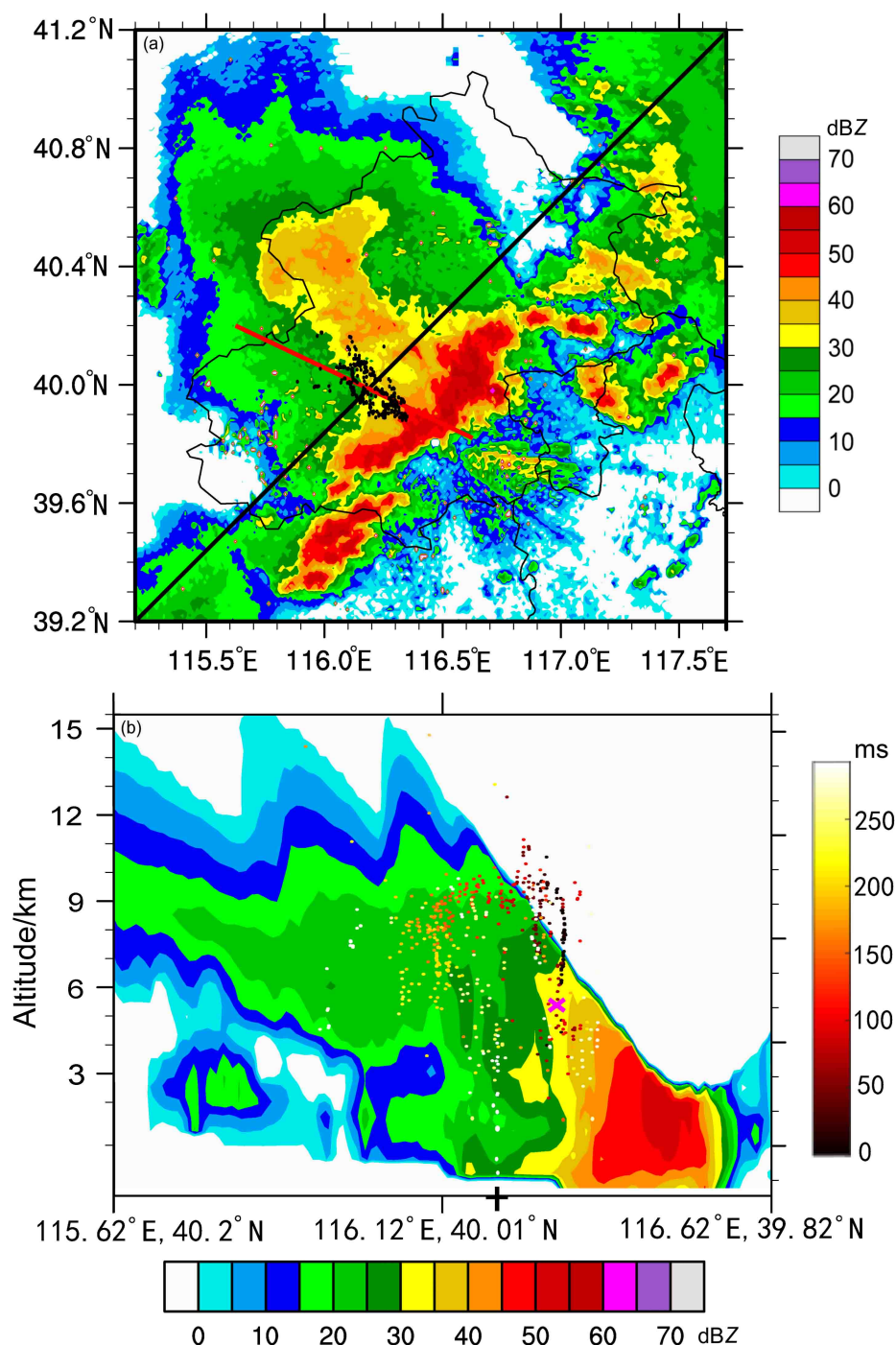


图9 2017年7月7日23时25分08秒正地闪辐射源与雷达回波(彩色阴影,单位:dBZ)的叠加:(a)水平分布;(b)沿图a中红色直线的剖面。图a中黑点代表辐射源,图b中右边的色标代表闪电辐射源随时间的变化,粉紫色“×”代表正地闪的始发位置,黑色“+”代表回击的位置

Fig. 9 The superpositions of lightning radiation source location results of PCG lightning flashes and radar echoes, which occurred at 2325:08 BJT on 7 July 2017: (a) Horizontal distribution; (b) cross-section along the red line in Fig. a. In Fig. a, black dots indicate the radiation sources. The color bar on the right of Fig. b is the change of lightning flashes radiation source with time. In Fig. b, the pink purple “×” represents the starting position of the PCG lightning flashes and the black “+” represents the position of the return stroke

(2) 通过对一次强飑线雷暴过程整个生命史的闪电辐射源三维定位资料分析发现,这次雷暴过

程共探测到闪电11902次,以云闪为主,约占总闪的72%,地闪占总闪的28%,正地闪较少,仅占

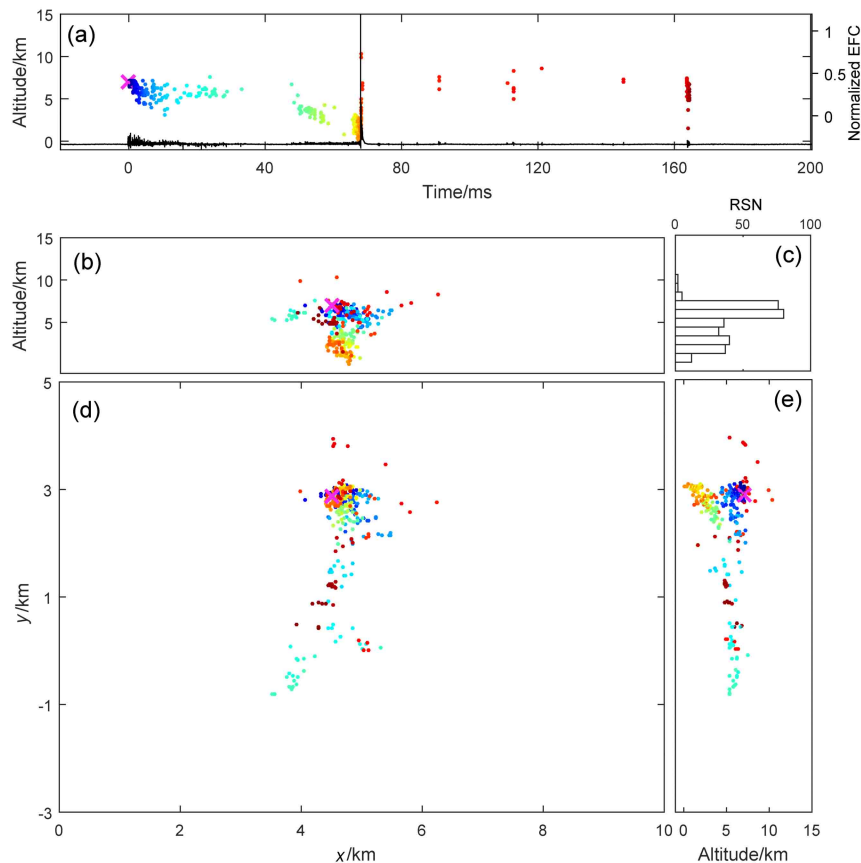


图 10 同图 7, 但为 2017 年 7 月 14 日 18 时 35 分 25 秒的一次单回击负地闪的三维结构图
Fig. 10 As in Fig. 7, but for 3D structure mapping of NCG at 1835:25 BJT on 14 July 2017

总地闪的 5%, 雷暴成熟期最大闪电频数为 $927 \text{ flashes (6 min)}^{-1}$ 。通过对比分析闪电辐射源位置 and 对应时刻的雷达回波, 发现辐射源基本集中在强回波范围内, 特别是对流塔区域。辐射源高密度区集中在 5~9 km, 高闪电密度区与 45 dBZ、50 dBZ 雷达回波顶高有很好的一致性, 与 50 dBZ 强回波面积也有较好的一致性。这表明 BLNET 不仅可以提供比较合理的辐射源二维信息, 跟踪和监测雷暴的发展演变过程, 而且可以提供辐射源的高度信息, 具有很好的三维定位能力, 与高分辨率天气雷达的反射率因子结合, 可以为雷暴天气系统的研究提供有价值的信息。

(3) 通过对两次典型的地闪个例的精细定位发现, 正地闪初始放电表现出明显的预击穿过程, 闪电辐射源的始发位置位于约 5.4 km, 之后放电通道向上发展, 为负极性的先导通道, 向上发展的负极性通道发展到约 10 km 左右, 通道开始沿着水平发展, 随后, 辐射源开始向下发展, 对应放电的正极性通道, 进而产生正回击。比较而言, 负地闪辐

射源起始于较高高度, 约 7.1 km, 但持续时间比该正地闪短, 约 175 ms。负地闪始发约 37 ms 后通道短暂停止, 之后约 12 ms 通道重新激发, 负先导开始快速垂直向下发展, 随后电场波形表现为明显的负极性回击波形。总之, 对闪电个例放电过程的定位结果表明, BLNET 可以通过事后分析, 获得闪电放电通道结构的详细信息。

值得指出的是, 本文的研究结果在很大程度上验证了更新升级后的 BLNET 对闪电辐射源三位定位的可靠性, 但也反映出了一些需进一步改进的问题。比如, BLNET 虽能很好地跟踪发生在探测范围内雷暴发展、演变过程, 但是对距离探测范围较远的地区探测效率偏低。将来, 打算进一步改进 BLNET 系统, 通过增加更多的测站和提高传感器的灵敏度, 扩大 BLNET 的有效探测范围, 采用更加先进的闪电定位算法, 以期得到更多更好的闪电三维定位结果。

致谢 感谢所有参与和建设北京多频段闪电三维定位网 (BLNET) 的成员。

参考文献 (References)

- Betz H D, Schmidt K, Laroche P, et al. 2009. LINET—An international lightning detection network in Europe [J]. *Atmospheric Research*, 91(2–4): 564–573. doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.012
- Biagi C J, Cummins K L, Kehoe K E, et al. 2007. National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003–2004 [J]. *J. Geophys. Res.*, 112(D5): D05208. doi:10.1029/2006JD007341
- 曹冬杰, 鄒秀书, 杨静, 等. 2011. 闪电初始放电阶段亚微秒电场变化波形特征 [J]. *大气科学*, 35(4): 645–656. Cao Dongjie, Qie Xiushu, Yang Jing, et al. 2011. Analysis on characteristics of sub-microsecond electric field change waveform during the initial stage of lightning discharge [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(4): 645–656. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.05
- Chronis T G, Anagnostou E N. 2003. Error analysis for a long-range lightning monitoring network of ground-based receivers in Europe [J]. *J. Geophys. Res.*, 108(D24): 4779. doi:10.1029/2003JD003776
- Chronis T G, Anagnostou E N. 2006. Evaluation of a long-range lightning detection network with receivers in Europe and Africa [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44(6): 1504–1510. doi:10.1109/TGRS.2006.871217
- Cummins K L, Cramer J A, Biagi C J, et al. 2006. The U.S. National Lightning Detection Network: Post-upgrade status [C]//Proceedings of the Second Conference on Meteorological Applications of Lightning Data. Atlanta, GA: American Meteorological Society.
- Fan X P, Zhang Y J, Zheng D, et al. 2018. A new method of three-dimensional location for low-frequency electric field detection array [J]. *J. Geophys. Res.*, 123(16): 8792–8812. doi:10.1029/2017JD028249
- 樊艳峰, 陆高鹏, 蒋如斌, 等. 2017. 利用低频磁场天线遥感测量人工引雷中的初始连续电流 [J]. *大气科学*, 41(5): 1027–1036. Fan Yanfeng, Lu Gaopeng, Jiang Rubin, et al. 2017. Application of low-frequency magnetic sensor for remote measurement of the initial continuous current in rocket-triggering lightning [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(5): 1027–1036. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16248
- Hamlin T D. 2004. The New Mexico tech lightning mapping array [D]. Ph. D. dissertation, New Mexico Institute of Mining and Technology.
- Jerauld J, Rakov V A, Uman M A, et al. 2005. An evaluation of the performance characteristics of the U.S. National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 110(D19): D19106. doi:10.1029/2005JD005924
- Krehbiel P R, Thomas R J, Rison W, et al. 2000. Lightning mapping observations in central Oklahoma [J]. *EOS*, 81(3): 21–25. doi:10.1029/00EO00014
- Lagouvardos K, Kotroni V, Betz H D, et al. 2009. A comparison of lightning data provided by ZEUS and LINET networks over western Europe [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5): 1713–1717. doi:10.5194/nhess-9-1713-2009
- Lhermitte R, Krehbiel P R. 1979. Doppler radar and radio observations of thunderstorms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 17(4): 162–171. doi:10.1109/TGE.1979.294644
- 黎勋, 鄒秀书, 刘昆, 等. 2017. 基于高时间分辨率快电场变化资料的北京地区地闪回击统计特征 [J]. *气候与环境研究*, 22(2): 231–241. Li Xun, Qie Xiushu, Liu Kun, et al. 2017. Characteristics of cloud-to-ground lightning return strokes in Beijing based on high temporal resolution data of fast electric field change [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 22(2): 231–241. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16007
- Li Y J, Zhang G S, Wen J, et al. 2012. Spatial and temporal evolution of a multi-cell thunderstorm charge structure in coastal areas [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(5): 498–508. doi:10.1002/cjg2.1745
- Li Y J, Zhang G S, Wen J, et al. 2013. Electrical structure of a Qinghai-Tibet Plateau thunderstorm based on three-dimensional lightning mapping [J]. *Atmospheric Research*, 134: 137–149. doi:10.1016/j.atmosres.2013.07.020
- 刘恒毅, 董万胜, 蔡力, 等. 2019. 一套双频段三维全闪电定位系统及其初步观测结果 [J]. *中国电机工程学报*, 39(12): 3561–3569. Liu Hengyi, Dong Wansheng, Cai Li, et al. 2019. Initial results of a dual band 3-D lightning locating system [J]. *Proceedings of the CSEE (in Chinese)*, 39(12): 3561–3569. doi:10.13334/j.0258-8013.pcsee.181285
- Lu G P, Cummer S A, Li J B, et al. 2013. Coordinated observations of sprites and in-cloud lightning flash structure [J]. *J. Geophys. Res.*, 118(12): 6607–6632. doi:10.1002/jgrd.50459
- Lu G P, Jiang R B, Qie X S, et al. 2014. Burst of intracloud current pulses during the initial continuous current in a rocket-triggered lightning flash [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 41(24): 9174–9181. doi:10.1002/2014GL062127
- Maier L, Lennon C, Britt T, et al. 1995. Lightning Detection and Ranging (LDAR) system performance analysis [C]//Proceedings of the 6th Conference on Aviation Weather Systems. Dallas, Texas: American Meteorological Society.
- Poehler H, Lennon C. 1979. Lightning Detection and Ranging (LDAR) system description & performance objectives [J]. NASA Technical Memorandum, 74106: 86.
- Rison W, Thomas R, Krehbiel P R, et al. 1999. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26(23): 3573–3576. doi:10.1029/1999GL010856
- Shao X M, Stanley M, Regan A, et al. 2006. Total lightning observations with the new and improved Los Alamos Sferic Array (LASA) [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23(10): 1273–1288. doi:10.1175/JTECH1908.1
- Srivastava A, Tian Y, Qie X S, et al. 2017. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 197: 76–83. doi:10.1016/j.atmosres.2017.06.026
- 孙凌, 陈志雄, 徐燕, 等. 2019. 北京一次强飚线过程的闪电辐射源演变特征及其与对流区域和地面热力条件的关系 [J]. *大气科学*, 43(4): 759–772. Sun Ling, Chen Zhixiong, Xu Yan, et al. 2019.

- Evolution of lightning radiation sources of a strong squall line over Beijing metropolitan region and its relation to convection region and surface thermodynamic condition [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(4): 759–772. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18128
- 孙萌宇, 鄒秀书, 孙凌, 等. 2020. 北京城区相继多次降雪的一次强雷暴的闪电特征 [J]. *大气科学*, 44(3): 601–610. Sun Mengyu, Qie Xiushu, Sun Ling, et al. 2020. Lightning activity of a severe thunderstorm with several hail-fall stages in Beijing metropolitan region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(3): 601–610. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.19134
- Sun Z L, Qie X S, Liu M Y, et al. 2013. Lightning VHF radiation location system based on short-baseline TDOA technique—Validation in rocket-triggered lightning [J]. *Atmospheric Research*, 129–130: 58–66. doi:10.1016/j.atmosres.2012.11.010
- Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. 2004. Accuracy of the lightning mapping array [J]. *J. Geophys. Res.*, 109(D14): D14207. doi:10.1029/2004JD004549
- Uman M A, McLain D K, Krider E P. 1975. The electromagnetic radiation from a finite antenna [J]. *Am. J. Phys.*, 43(1): 33–38. doi:10.1119/1.10027
- Uman M A, Beasley W H, Tiller J A, et al. 1978. An unusual lightning flash at Kennedy Space Center [J]. *Science*, 201(4350): 9–16. doi:10.1126/science.201.4350.9
- 徐燕, 孙竹玲, 周筠珺, 等. 2018. 一次具有对流合并现象的强飚线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系 [J]. *大气科学*, 42(6): 1393–1406.
- Xu Yan, Sun Zhuling, Zhou Yunjun, et al. 2008. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(6): 1393–1406. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17220
- 王东方, 鄒秀书, 袁铁, 等. 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 [J]. *气象学报*, 67(1): 165–174. Wang Dongfang, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. 2009. An analysis on the initial stage of intracloud lightning with the location technique of fast electric field change pulses [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 67(1): 165–174. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.01.017
- 王东方, 鄒秀书, 袁善锋, 等. 2020. 北京地区的闪电时空分布特征及不同强度雷暴的贡献 [J]. *大气科学*, 44(2): 225–238. Wang Dongfang, Qie Xiushu, Yuan Shanfeng, et al. 2020. Spatial and temporal distribution of lightning activity and contribution of thunderstorms with different lightning-producing capabilities in Beijing metropolitan region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(2): 225–238.
- 王宇, 鄒秀书, 王东方, 等. 2015. 北京闪电综合探测网 (BLNET): 网络构成与初步定位结果 [J]. *大气科学*, 39(3): 571–582. Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2015. Beijing Lightning Network (BLNET): Configuration and preliminary results of lightning location [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(3): 571–582. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14138
- Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. 2016. Beijing Lightning Network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes [J]. *Atmospheric Research*, 171: 121–132. doi:10.1016/j.atmosres.2015.12.012
- Wu B, Zhang G S, Wen J, et al. 2016. Correlation analysis between initial preliminary breakdown process, the characteristic of radiation pulse, and the charge structure on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *J. Geophys. Res.*, 121(20): 12434–12459. doi:10.1002/2016JD025281
- Zhang G S, Wang Y H, Qie X S, et al. 2010. Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 53(4): 591–602. doi:10.1007/s11430-009-0116-x
- Zhang H B, Lu G P, Qie X S, et al. 2016. Locating narrow bipolar events with single-station measurement of low-frequency magnetic fields [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 143–144: 88–101. doi:10.1016/j.jastp.2016.03.009