王宇, 郄秀书, 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, doi: 10.3878/j.issn. 1006-9895.1407.14138. 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.

北京闪电综合探测网(BLNET): 网络构成与 初步定位结果

王宇^{1,3} 郄秀书¹ 王东方¹ 刘明远¹ 苏德斌² 沈永海² 武智君^{1,3} 刘冬霞¹ 孙竹玲^{1,3}

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室,北京 100029
 2 北京市气象局大气探测中心,北京 100081
 3 中国科学院大学,北京 100049

摘 要 北京闪电综合探测网(Beijing Lightning NETwork,简称 BLNET)由 10 个观测站组成,每个子站主要由 闪电快、慢电场变化测量仪(也称快、慢天线)和闪电甚高频(VHF)辐射探测仪构成,实现了对闪电的多频段 的综合观测。本文首先详细介绍了 BLNET 的网络构成,然后利用蒙特卡罗法对网络的定位误差进行了理论分析, 模拟结果表明网络内部水平定位误差小于 200 m,网络外部 100 km 处水平定位误差小于 3 km,最后利用 Chan 氏 算法和 Levenberg-Marquardt 算法相结合的方法,对发生在 2013 年 7 月 7 日的一次雷暴过程分别进行了地闪和云 闪定位,将定位结果和对应时次的雷达回波进行比较,发现地闪和云闪都出现在大于 30 dBZ 的雷达回波区,表明 了探测网络和定位方法的可靠性。

关键词 北京闪电网 到达时间差 误差分析 闪电定位
 文章编号 1006-9895(2015)03-0571-12
 中图分类号 P411
 文献标识码 A
 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14138

Beijing Lightning NETwork (BLNET): Configuration and Preliminary Results of Lightning Location

WANG Yu^{1, 3}, QIE Xiushu¹, WANG Dongfang¹, LIU Mingyuan¹, SU Debin², SHEN Yonghai², WU Zhijun^{1, 3}, LIU Dongxia¹, and SUN Zhuling^{1, 3}

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

2 Meterological Observation Centre, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100081

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The Beijing Lightning NETwork (BLNET) consisting of ten stations has recently been developed, with each station composed of a fast antenna, a slow antenna and a lightning VHF (Very High Frequency) radiation detection system, forming a lightning network with capability formulti-band integrated lightning observation, including VLF, LF, HF, and VHF frequency bands. In this paper, a detailed configuration of the infrastructure of BLNET is described, and atheoretical analysis of lightning location error using the Monte Carlo methodis presented. The simulation resultsshowed that the 2-D location error was less than 200 m within the network and 3 kmat the range of 100 km outside the network. Finally, using

收稿日期 2014-03-08; 网络预出版日期 2014-07-23

资助项目 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目 2014CB441401,中国科学院科研装备研制项目 YZ201206,国家自然科学基金重点项目 40930949 作者简介 王宇,男,1987 出生,博士研究生,主要从事大气电学方面的研究。E-mail: wangyu@mail.iap.ac.cn

a combined method incorporating Chan and Levenberg–Marquardt algorithms, we located all the cloud-to-ground lightning and intra-cloud lightning that accompanied the thunderstorm which passed over the network on July 7, 2013. A comparison of the location results with the corresponding radar data showed good agreement, validating a high performance of the BLNET and the proposed location algorithm.

Keywords Beijing Lightning NETwork, Time difference of arrival, Error analysis, Lightning location

1 引言

闪电是自然界中发生的一种强烈的大气放电 现象,每年在全世界范围内造成大量的人员伤亡和 财产损失(Curran et al., 2000; Zhang et al., 2010), 而随着人类航空、航天活动的日益频繁以及电子产 品向低电压、低功耗和高集成度方向发展,闪电对 人类生产生活的影响也越来越大。因此,开展闪电 的探测与定位研究,了解闪电的时空分布特征,进 而实时地监测闪电活动,对闪电研究、闪电灾害调 查和灾害防范的意义重大。

目前的闪电定位系统一般由时间同步的多个 观测站组成。根据探测频段的不同,闪电定位系统 主要分为低频闪电定位系统和甚高频闪电定位系 统。由于地闪回击辐射的电磁信号主要集中在低频 段,国际上在二十世纪八十年代初就发展了专门针 对地闪进行定位的闪电定位网,主要通过探测闪电 甚低频和低频频段(VLF/LF)地波的到达时间和到 达方位角来定位回击的二维位置和发生时刻,如美 国国家闪电定位网(National Lightning Detection Network,简称 NLDN)。之后,美国又发展了洛斯 阿拉莫斯天电阵列(Los Alamos Sferic Array,简称 LASA),欧洲发展了闪电探测网(Lightning detection Network,简称 LINET)等,LASA 和 LINET 同时 实现了对云闪和地闪的定位。

NLDN 在美国有 100 多个传感器,采用到达时 间(Time of arrival)和磁定向(Magnetic Direction Finder)相结合的方法来定位回击(Cummins and Murphy, 2009),其定位精度优于 500 m,对地闪 的探测效率优于 90%(Biagi et al., 2007)。LASA 实 际上是一套 GPS(Global Positioning System)同步 的快天线定位系统(Shao et al., 2006),探测频段为 160 Hz~20 MHz,资料处理时,先利用希尔伯特变 换将原始数据转换为功率波,然后寻取功率波的 峰值,并进行峰值点的匹配,最后进行拟合计 算。LASA 还可以利用原始资料区分出放电事件的 类别,主要包括+CG(Cloud-to-Ground lightning)、 -CG、IC(Intracloud lightning)、+NBE(Narrow Bipolar Event)和-NBE 五类闪电。在欧洲十多个 国家布网的 LINET,通过接收闪电辐射的低频磁场 来定位地闪和云闪,由于观测站分布密集,定位精 度可达到 150 m (Betz et al., 2009)。

在甚高频(VHF)闪电定位系统方面,目前主 要有两种定位方法,一种是到达时间差(TDOA) 法,另一种是干涉法。比较有代表性的 TDOA 法定 位网是上世纪 70 年代在美国肯尼迪航天中心运行 的 LDAR (Lightning Detection and Ranging) 系统以 及九十年代美国新墨西哥矿业技术学院发展的 LMA(Lightning Mapping Array)系统。LDAR 由 七个观测站组成(一个中心站,六个观测站均匀分 布在中心站周围),覆盖直径约 16 km 的范围, Rustan et al. (1980) 分析了 LDAR 对一次击中肯尼 迪航天中心 150 m 气象塔的 3 回击地闪的定位结 果,发现 LDAR 对首次回击前的预击穿过程和先导 过程都可以进行三维定位。LMA 是近年来闪电研 究领域发展最为迅速的一个闪电定位网,其水平定 位误差仅 6~12 m, 垂直误差为 20~30 m, LMA 对一次孤立的闪电一般可以探测到几百到几千个 辐射事件,能清晰地刻画闪电发展的图像(Thomas et al., 2004), 目前已经在美国多个地区建设了区域 性的网络。随着数字信号处理技术的发展,利用干 涉法定位闪电也取得了很大的进步,经历了从早期 的窄带干涉仪(Kawasaki et al., 1994)到宽带干涉仪 (Shao et al., 1996) 再到数字宽带干涉仪(Yoshida et al., 2010) 几个阶段,干涉法闪电定位系统一般 探测距离短,主要用于场地实验中进行闪电的观测 研究。

我国的闪电定位研究开始于上世纪 80 年代, 目前气象部门和电力部门分别在全国多个省、自治 区和直辖市安装了区域性的地闪定位网(张义军 等,2006; Chen et al.,2002)。在 VHF 闪电定位系 统方面国内也有一些研究成果,如 Zhang et al. (2010)研制成功了类似于 LMA 的到达时间差定 位系统; Dong et al.(2011)发展了宽带干涉仪闪电 定位系统; Sun et al.(2013)在曹冬杰等(2012) 工作基础上,进一步发展完善了短基线时间差定位 系统。闪电定位网的发展方向是不断提高探测效率 和定位精度,并尽可能地将地闪和云闪的定位整合 到同一个网络中。总体而言,国内在地闪定位和云 闪定位方面都有涉及,但是一方面网络的探测效 率、定位精度需要进一步提高,覆盖范围需要进一 步扩大,另一方面尚缺乏对闪电(包括地闪和云闪) 不同频段辐射源进行同步观测和定位的完善的定 位网。

2 北京闪电网介绍

北京闪电网 (BLNET) 从 2008 年开始建设,最 初仅有 7 个测站,主要传感器为闪电快、慢电场变 化测量仪 (即快、慢天线)和大气平均电场仪,此 后探测网络和传感器不断优化和完善。2013 年, BLNET 发展到 10 个观测子站,分布在北京的 8 个 区县,网络覆盖面积约 3000 平方公里。站点分布 图如图 1 所示。值得一提的是,在大气所测站(DQS) 西南方向约 900 m 处有一座 325 m 的气象塔,非常



图 1 2013 年北京闪电网站点分布图,图中黑色方块为观测站(DQS: 大气所站; CP: 昌平站; DX: 大兴站; GJ: 古将站; HR: 怀柔站; NY: 南苑站; SJS: 石景山站; SY: 顺义站; TZ: 通州站; YQ: 延庆 站)

Fig. 1 The site map of BLNET (Beijing Lightning NETwork) in 2013, the black squares represent observation sites (DQS: DaqiSuo; CP: Changping; DX: Daxing; GJ: Gujiang; HR: Huairou; NY: Nanyuan; SJS: Shijingshan; SY: Shunyi; TZ: Tongzhou; YQ: Yanqing)

有利于闪电的光学观测,在闪电击中大塔的情况 下,可以开展定位网的误差和探测效率验证方面的 工作。目前,基于互联网,BLNET 已经实现了对 观测站的远程监控,在中心站可以根据需要控制其 他观测站的开启、关闭以及采集参数的配置。

目前,BLNET 的单个观测站由快、慢天线以 及闪电甚高频辐射源探测系统构成。图 2 为昌平 (CP)站室外天线实物图,快、慢天线探测频段分 别为1kHz~2 MHz、10Hz~1 MHz,时间常数分 别为0.1 ms和200 ms(曹冬杰等,2011;王东方等, 2011),甚高频探测系统的探测频段为69 MHz~75 MHz,但是在进行信号调理时通过对数检波将信号 下变频到0~6 MHz。每个探测子站配置一套高精 度GPS 时钟,授时精度为50 ns(10⁻⁹ s),用于多 站之间的时间同步。图中的大气平均电场仪不是 BLNET 的核心探测设备,仅在个别子站配置。

单站BLNET的数据采集利用NIPCI-5105采集 板卡完成,采集系统工作原理示意图如图3所示。 首先闪电辐射信号由三个不同频段的天线接收,信 号在天线后端的调理电路中进行信号调理,当信号 强度超过采集板卡设置的阈值时,信号进入采集板 卡,进行模数转换、波形显示和数据存储等操作, 与此同时采集板卡发出触发信号给 GPS 接收机,使 GPS 接收机将触发时刻的绝对时间通过串口反馈 给工控机,这样就完成了一次闪电信号的采集和记 录。采集板卡的采样率设置为 15 MS s⁻¹ (Mega Samples per second),以满足对 VHF 包络信号的采 集,但是对于快、慢天线的探测频段而言,此采样 率的设置偏高,为了能够对三种信号同时采集,并 尽可能地减小数据量,在采集软件中将采集到的 快、慢天线数据,每三个采样点中仅储存一个采样 点,即三个点的平均值,这样快、慢天线的实际采 样率为 5 MS s⁻¹。

2013 年夏季, BLNET 共观测到 28 次雷暴天气 过程,记录到约 15 万个闪电,其中经过 BLNET 正 上方且持续时间较长的雷暴过程有 6 次,分别发生 于 2013 年 6 月 24 日、6 月 25 日、6 月 28 日、7 月 7 日、8 月 7 日、8 月 11 日。2013 年 7 月之前,各 观测站仅有快、慢天线,7 月份各站陆续增加了甚 高频探测系统,到七月底,除了怀柔(HR)站,其 他各站都增加了 VHF 探测系统。图 4 给出了一次 同时被 BLNET 的 7 个测站记录到的闪电电场变化 波形和 VHF 辐射波形,该闪电为一次 6 回击的负



图 2 北京闪电网 (BLNET) 昌平 (CP) 站室外天线,从左到右依次为快天线、慢天线、大气电场仪和甚高频天线 Fig. 2 Photograph of the BLNET sensors at CP station. From left to right, they are fast antenna, slow antenna, electric field mill, and VHF (Very High Frequency) sensor, respectively



图 3	BLNET 单站采集系统原理图
Fig. 3	Block diagram of one BLNET site

地闪,图中的局部展开图显示了其中一次同步的快 天线回击波形,在资料处理时,以回击大脉冲的峰 值点为参考确定脉冲到达时间。从图 4a 中可以看 出,闪电 VHF 辐射信号和快天线信号有很好的对 应,VHF 辐射信号比快天线信号更丰富,尤其是在 首次回击前和回击之间。从图 4d、f、g 可以看出, 慢天线的台阶电场变化和快天线的回击大脉冲有 很好的对应。本文仅就工作于甚低频至中频频段的 快天线资料进行分析。对甚高频资料的处理和分析 相对复杂,将另文处理和介绍。

北京闪电综合探测和定位网(Beijing Lightning NETwork, BLNET)的主要功能是:首先,各子站

记录闪电产生的电场变化和电磁辐射波形,通过统 计可以得到各种放电过程的波形特征参数(如极 性、脉冲宽度、脉冲持续时间、相邻脉冲之间的时 间间隔等),进而对放电过程本身的物理机制进行 研究(王宇等, 2014; Qie et al., 2013); 其次, 利 用记录到的多站慢电场变化波形可以对闪电放电 过程(如回击过程,连续电流过程等)中和的等效 电荷源的位置和电荷量进行拟合,进而深入了解云 中电荷的转移情况及雷暴云的等效电荷结构(武智 君等, 2013); 三是可以利用多站同步的快电场变 化脉冲,对闪电 VLF/LF 频段的辐射源进行定位 (王东方等, 2009); 四是利用 VHF 辐射源探测系 统,对闪电放电过程(特别是较小放电尺度的击穿 过程,如预击穿过程、梯级先导过程等)进行精细 的定位,通过了解闪电各种放电过程的时空演变特 征,并结合快、慢电场变化波形,对闪电的物理过 程进行分析和研究。

3 定位方法及网络误差分析

3.1 资料的预处理

对快天线资料的处理按照如下的流程进行:首 先对资料进行滤波降噪,然后寻找信号的峰值 点,再对不同测站找到的峰值点进行时间匹配,最 后进行定位计算。滤波降噪采用 Savitzky-Golay 方



图4 BLNET 记录到的一次七站同步的负地闪电场变化波形,图中灰色曲线为闪电甚高频信号,蓝色曲线为快天线信号,绿色曲线为慢天线信号。为便 于直观比较,快天线信号极性进行了反转。图中红色方框标出了一次同步的回击过程,右侧的子图为其局部展开图。图中的零时刻表示以首次回击 的到达时刻为时间参考点

Fig. 4 Waveform of one seven-station synchronized negative CG (Cloud-to-Ground lightning) flash recorded by BLNET, the gray curve in the first panel indicates VHF signal, the blue curves indicate fast antenna signals, and the green curves indicate the slow antenna signals. For the convenience of display, the sign of fast antenna signals are reversed. The red box in each panel mark out a synchronized return stroke that is enlarged to show in the sub-panels. The zero value of the time axis represents that the arrival time of the first RS (Return Stroke) is set as the time reference

法(Savitzky and Golay, 1964),这种方法在滤除 噪声的同时,能尽可能地保持原始信号的波形,以 尽量减小峰值点的移位。如果资料中存在明显的 谐波干扰,如电源干扰,还需要进行滤除谐波的处 理。在寻找峰值的过程中通过控制阈值和信号脉冲 的上升沿陡度来寻取有物理意义的闪电脉冲信号。

当对不同测站的资料都完成寻峰操作之后,就 开始对脉冲进行配对,要想通过程序准确地找出一 组由同一闪电放电过程辐射出的脉冲是一件非常 困难的事,我们按照如下的方法进行脉冲匹配:选 择某一测站为基准站(一般选择中心站为基准站, 但是当中心站缺测或者中心站资料的信噪比不高 时,则选择其他站为基准站),对基准站的每一个 脉冲,按照一定的时间窗口到其他测站寻找所有满 足条件的脉冲,此时间窗口由电磁波在基准站和其 他测站之间传播所需要的时间给出。因为同一辐射 源脉冲到达两个测站的时间差不可能大于电磁波 在两个站点之间传播所耗的时间。对基准站的每一 个脉冲进行相同的操作即完成整段资料的时间匹 配,接下来就进入定位计算的环节。

3.2 定位方法: Chan 氏算法和Levenberg- Marquardt 算法的结合

对于每一个粗略匹配起来的组合,里面的任意 一种组合方式都有可能计算得到一个真实的辐射 源,因此对每一种组合方式都进行计算,通过比较 选出最优结果作为真实辐射源。具体定位方法介绍 如下(以二维定位为例):

假设地闪击地点 *P* 的位置为(*x*, *y*),发生时刻为 *t*,观测站 *S_i* 的位置为(*x_i*, *y_i*),接收到辐射源的时间 为 *t_i*,其中 *i*=1,2,...,*n*,共*n*个观测站接收到辐射 信号,电磁波传播速度为 *c*,则可以得到如下的非 线性方程组:

$$\begin{cases} \sqrt{\left(x-x_{2}\right)^{2}+\left(y-y_{2}\right)^{2}} -\sqrt{\left(x-x_{1}\right)^{2}+\left(y-y_{1}\right)^{2}} = c\Delta t_{21}, \\ \sqrt{\left(x-x_{3}\right)^{2}+\left(y-y_{3}\right)^{2}} -\sqrt{\left(x-x_{1}\right)^{2}+\left(y-y_{1}\right)^{2}} = c\Delta t_{31}, \\ \vdots \\ \sqrt{\left(x-x_{n}\right)^{2}+\left(y-y_{n}\right)^{2}} -\sqrt{\left(x-x_{1}\right)^{2}+\left(y-y_{1}\right)^{2}} = c\Delta t_{n1}, \end{cases}$$

$$(1)$$

其中, $n \ge 3$ 时, $\Delta t_{ij}(t_i - t_j)$ 为 *i* 站和 *j* 站之间的到 达时间差。公式(1)的每一行实际上确定了一条 平面上的单叶双曲线,理论上两条双曲线的交点就 是 P 点的位置,这种确定辐射源位置的方法即为到 达时间差法。但是实际上每个观测站测到的到达时 间都存在误差,如图 5 所示,真实辐射源 P 在两条 黑色粗实线的交点上,由于时间测量存在误差,导 致 P 有可能位于误差上下限(黑色细实线表示)交 汇所确定的网格内(图 5 中灰色区域内)的任意一 点,为了减小这种不确定性,就需要加入更多的观 测站,即公式(1)中需要更多的方程,通过最小 二乘拟合的方式可以确定 P 的最佳位置。



图 5 带有时间测量误差的到达时间差法定位原理示意图, P 表示辐射 源位置, S₁、S₂、S₃为观测站

Fig. 5 Illustration of TOA (Time of Advent) location with time measurement error, P represents the radiation source; S_1 , S_2 and S_3 are observation sites

具体定位过程中,我们采用 Chan 氏算法和 Levenberg-Marquardt 算法相结合的方法进行定位。 Chan 氏算法是求解公式(1)中双曲线方程的一种 非迭代算法,当时间测量的误差较小时,Chan 氏算 法近似于最大似然估计 (Chan et al., 1994), 而 Levenberg-Marquardt 算法是进行最小二乘拟合的 最优化算法,算法中通过引入惩罚因子将高斯一牛 顿方法和最速下降法结合起来(Gill and Murray, 1981)。我们先利用 Chan 氏算法给出初始解,相当 于将 P 置于图 5 中的误差网格区域内, 然后将初始 解代入列 Levenberg-Marquardt 算法中进行最小二 乘拟合,如果所有组合方式的拟合优度 χ^2 的最小值 小于给定的阈值,则接受该结果为一个真实辐射 源,这一过程相当于在误差网格内搜索 P 的最佳位 置。当第一个真实的辐射源找到之后,可以认为接 下来的辐射源发生在第一个真实辐射源的附近,因 此各个测站接收到辐射源脉冲的时间顺序和第一 个真实辐射源到达各个测站的顺序大体一致,这样 就可以剔除掉一些不符合这一时间顺序的组合方 式,从而节省计算量(Hamlin, 2004)。

3.3 定位误差理论分析

到达时间差法的定位精度主要取决于对信号 到达时间测量的精度。一方面由于采样率有限,如 快、慢天线的采样率为5 MS s⁻¹,进行模数转换时, 采样间隔给时间测量带来不确定性;另一方面,利 用软件寻找信号的峰值也存在一定偏差;另外,信 号在传播过程中由于地形等因素的影响也会发生 一定程度的波形畸变。综合以上因素,估计闪电信 号到达时间存在1 μs 的误差(王东方等,2009), 需要指出,闪电距离网络的距离越远,时间测量的 误差越大。下面采用蒙特卡罗法对 BLNET 的定位 误差进行理论分析。

假设从距离中心站 5 km 到 150 km 每隔 5 km 有一圈理想的辐射源,理想辐射源按照如下方式产 生(以25km处辐射源为例):从0时刻到48s,每 秒发出一个辐射源,0时刻发出的辐射源在网络坐 标系 X 轴正方向上, 高度为 0, 即此时辐射源直角 坐标为(5 km, 0, 0), 接下来每秒发出的辐射源 水平位置以 25 km 为半径逆时针旋转 $\pi/24$,同时高 度递增 312.5 m, 这样到 48 s 时, 辐射源坐标为 (5 km, 0, 15 km)。按照这种方式, 48 个理想辐射源 在水平方向上呈圆形分布,在高度上呈等间距分 布,总体上呈螺旋状分布。对于每一时刻的辐射源, 其到达每一个测站的时间可以准确知道,现在到达 时间的基础上叠加服从零均值、均方差为 1 us 方 的正态分布的随机噪声,然后重新计算辐射源的位 置,将该位置和理论位置对比得到定位误差。对每 一个辐射源,将叠加噪声和计算位置的操作重复 10000次,就可以得到辐射源的平均位置。

图 6 是 BLNET 理论上的定位误差分布图。图 中左下角为俯视图,黑色方块代表测站,等值线显 示了 BLNET 的水平定位误差分布。在网络的内 部,水平定位误差总体上不超过 200 m,许多区域 误差甚至不超过 100 m,到 100 km 处,水平定位误 差普遍小于 3 km。值得一提的是,由于 BLNET 在 南北方向上的覆盖范围大于东西方向的覆盖范围, 即在南北方向上呈长条状分布,因此整个网络在东 西方向上的水平定位误差更小,通过等值线可以看 出,在东西方向上网络外部 100 km 处,水平定位 误差约 1 km,而在南北方向上的相同区域,定位误 差已经达到 3 km。从俯视图可以看出,25 km 处水 平定位误差很小,理想辐射源和反算的辐射源基本 重合。俯视图上方是东西方向投影图,理想辐射源 呈螺旋状分布,而反算的辐射源并不与理想辐射源 重合,说明定位的高度误差较大。俯视图右侧是南 北方向投影图,和东西方向投影图情况类似。在南 北方向投影图的上方是对辐射源的高度统计图,如 果对高度的定位准确,从0到15 km,辐射源的高 度应该均匀分布。图6的最上方是高度随时间的分 布图,结合图中的序号,可以明显看出,高度较低 的部分"O"和"×"很少重合,说明高度的定位 误差较大,而在高度较高时,高度的定位误差相对 小。这主要是由于 BLNET 各个测站的高度差异较 小造成的,要提高 BLNET 对高度的定位精度,一 方面可以增加各测站位置的高度落差,另一方面可 以进一步提高时间测量的精度。

4 一次雷暴过程的闪电定位结果

2013 年 7 月 7 日 BLNET 观测到了一次过顶雷 暴过程,该雷暴过程从北京西北方向进入北京观象 台的雷达观测范围,东南方向移出雷达探测范围, 历时 16 个小时,此次雷暴过程被 BLNET 一个及一 个以上测站记录到的闪电总共有 6855 个,其中 2 站及 2 站以上同步资料 3305 个,4 站及 4 站以上同 步资料 1306 个。

4.1 地闪定位结果

利用4站及4站以上同步的资料对此次雷暴过 程的地闪进行了定位,定位结果见图7,雷暴主体 从2013年7月7日14:00(协调世界时,下同)开 始进入BLNET上方,16:00强回波中心到达网络中 心站上方,20:00逐渐移出探测网络。这段观测时 间内总共定位出2280次回击,地闪随时间的演变 特征很好地反映了雷暴在BLNET有效探测范围内 的移动情况。图8是闪电定位结果和6分钟内雷达 回波的叠加,发现地闪回击的定位结果都位于雷达 回波大于30 dBZ的回波区,说明定位结果是可信 的。09:54是BLNET最早探测到此次雷暴过程的时 刻,说明BLNET的有效探测范围约为150km。16:00 至18:00,地闪频率最大,雷暴强回波中心在此阶 段处于BLNET的正上方。此后,雷暴逐渐向东南 方向移动,网络探测到的地闪频数减小(图略)。

4.2 云闪定位结果

由于快天线的探测频率上限可达到2MHz,也 可以探测到放电尺度较大(>100 m)的云闪过程 辐射的电磁信号,下面利用 BLNET 采集到的快天 线资料对云闪过程进行定位。我们选取雷暴处于网



图 6 BLNET 理论定位误差分布图:(a)辐射源高度随时间的变化;(b)东西方向投影;(c)高度分布;(d)平面视图;(e)南北方向投影。图中的"O"代表上文提到的距离中心站 25 km 处的理想辐射源,"×"代表叠加1μs噪声后反算出的辐射源

Fig. 6 The estimated location error of the BLNET, the circles indicate the ideal radiation sources that are 25 km away from the central station, and the crosses indicate the inversed radiation locations when noises are added to the arrival times. (a) Altitude change over time; (b) east-west projection of the radiation sources; (c) distribution of altitude; (d) pan view of the sources; (e) north-south projection of the sources

络上方、且雷达有较好探测资料的两个时间段,即 16:00~16:06 和 18:00~18:06,对其所对应的云闪 分别进行了定位,并与雷达回波叠加示于图 9,可 以看到,绝大部分定位结果位于雷达图强回波区, 但也有少数云闪不在强回波区内,而处于强回波区 边缘,可能是由于在6分钟内雷达才完成一次体扫, 而雷暴云在此过程中已经发生了移动。在 16:00~ 16:06 内, 共定位出 45 个脉冲, 我们规定如果两个脉冲水平位置的距离小于 10 km, 并且发生的时间间隔小于 500 ms, 则将这两个脉冲归为同一次闪电(Cummins et al., 1998), 按照这种划分方式, 在此时间段内, 共定位出 18 次闪电, 云闪频次为 3 次/分钟。18:00~18:06 内, 共定位出 208 个脉冲, 这些脉冲来自 26 次云闪过程, 此时间段内的闪电频





次约每分钟4次。

5 结论和讨论

本文对北京闪电网 (BLNET) 的硬件构成、采 集方案、定位方法进行了详细介绍,对 BLNET 现 有网络拓扑结构下的定位误差进行了理论分析,并 对发生于 2013 年 7 月 7 日一次经过探测网络上空 的雷暴过程的地闪和云闪进行了定位和分析,初步 结论如下:

(1) 2013 年 BLNET 设置有 10 个观测站,每 个子站配备有闪电快天线、慢天线、VHF 辐射源探 测器三套探测系统,实现了对闪电的 VLF、LF、 HF 和 VHF 的多频段综合观测,可覆盖面积约 3000 平方公里,站间采用高时间精度的 GPS 进行时间同 步。 (2)对 BLNET 网络定位误差理论分析后发现, 在网络内部,水平定位误差较小,但是高度定位误 差较大,分析可能的原因是站点的高度落差偏小, 当辐射源的到达时间存在一定误差时,对高度定位 的误差就会被放大。BLNET 在东西方向的定位误 差小于南北方向的定位误差,原因是测站在南北方 向上的覆盖范围大于东西方向。

(3)利用4站及4站以上同步的快天线资料可 以很好地对从 BLNET 网络上方过境的雷暴过程进 行地闪的定位,定位结果反映了雷暴的移动情况, 将定位结果和雷达图进行对比分析,发现地闪基本 都发生于雷达图大于 30 dBZ 的强回波区,说明定 位方法正确,定位结果可信。

(4)利用多站同步的快天线资料也可以对云闪 进行定位,云闪基本处于雷达强回波区内,极个别



图 8 地闪定位结果和雷达组合反射率的叠加图, "+"代表地闪定位结果, 8 幅雷达回波图代表了雷暴发展的 8 个时刻, 雷达图中的最小圆圈半径为 30 km, 最大圆圈半径为 150 km

Fig. 8 The comparison between CG flash location and the corresponding radar reflectivity, the plus signs indicate the CG location results, eight pictures represent eight distinct phases of the thunderstorm, the radius of the inner circle and the outer circle are 30 km and 150 km



图 9 16:00~16:06 以及 18:00~18:06 云闪定位结果和雷达组合反射率图叠加, "+"代表云闪定位结果 Fig. 9 Comparison between IC (Intracloud lightning) flash location and radar reflectivity in the periods of 1600 UTC-1606 UTC and 1800 UTC-1806 UTC, the plus signs represent the location results of IC flash

不在雷达回波区的定位结果,一方面可能是由于雷 达体扫周期较长,雷暴过程自身发生移动造成,另 一方面也可能是由于定位误差造成的,因为云闪的 电场变化脉冲没有地闪的回击大脉冲特征明显,定 位程序在自动寻找脉冲峰值和进行时间匹配的过 程中可能出现误差,最终造成定位结果的误差。因 此云闪的定位应该选择 VHF 频段的探测器资料, 这一工作将在接下来的研究中开展。

BLNET 是一个综合性的闪电探测与定位网络, 相比于其他的闪电定位网络,其优势在于储存了闪 电多频段的辐射信号波形,利用慢电场变化波形可 以进行电荷源的拟合和雷暴云等效电荷结构的反 演,利用快电场变化波形可以统计特定的闪电放电 过程的波形参数,还可以对 VLF/LF 频段的辐射源 3 期 王字等:北京闪电综合探测网(BLNET):网络构成与初步定位结果 No. 3 WANG Yu et al. Beijing Lightning NETwork (BLNET): Configuration and Preliminary Results of Lightning Location

进行定位,利用闪电 VHF 辐射源信号可以对闪电 放电通道的精细结构进行刻画。而其劣势也正是其 优势造成的,由于存储了记录到的波形,导致 BLNET 目前尚不能实时地对闪电进行定位处理。 本文介绍了对快天线资料处理的初步结果,说明利 用多站同步的快天线资料,可以对经过网络上方的 雷暴过程进行地闪和云闪的定位,可以定位和跟踪 雷暴强对流中心的发展和变化情况。但是,定位的 精度没有经过实际检验,仅仅是从理论上进行了模 拟和分析,接下来我们将借助于位置可知的闪电击 中高建筑物时的闪电光学手段或其他途径对 BLNET 的定位精度进行实际检验。

本文的研究结果说明了当前 BLNET 定位方案 的可行性,当然也反映出了一些需进一步改进的问 题。首先要进一步提高资料的质量,降低环境干扰 的影响(如电源干扰),提高传感器灵敏度的信噪 比。其次要进一步优化网络结构,使网络的误差分 布更加合理。在资料质量进一步提高之后,结合雷 达观测资料和光学观测资料,相信 BLNET 将在闪 电物理和闪电气象学的研究方面发挥重要作用。

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.
- 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.: Atmos., 112 (D5), doi:10.1029/2006JD007341.
- 曹冬杰, 郄秀书, 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 waveforms during the initial stage of lightning discharge [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 645– 656.
- 曹冬杰, 郄秀书, 段树, 等. 2012. 基于 VHF 辐射源短基线定位系统对 闪电放电过程的研究 [J]. 物理学报, 61 (6): 069202. Cao Dongjie, QieXiushu, Duan Shu, et al. 2012. Lightning discharge process based on short-baseline lightning VHF radiation source locating system. [J]. Acta Phys. Sin (in Chinese), 61 (6): 069202.
- Chan Y T, Ho K C. 1994. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 42 (8): 1905–1915.
- Chen S M, Du Y, Fan L M, et al. 2002.A lightning location system in China: Its performances and applications [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 44 (4): 555–560.
- Cummins K L, Krider E P, Malone M D. 1998. The US national lightning detection networkTM and applications of cloud-to-ground lightning data

by electric power utilities [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 40 (4): 465–480.

581

- 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 [J]. IEEE Transactions onElectromagnetic Compatibility, 51 (3): 499–518.
- Curran E B, Holle R L, López R E. 2000. Lightning casualties and damages in the United States from 1959 to 1994 [J]. J. Climate, 13 (19): 3448– 3464.
- Dong WS, Liu XS, Yu Y, et al. 2001.Broadband interferometer observations of a triggered lightning [J]. Chinese Science Bulletin, 46 (18): 1561– 1565.
- Gill P R, Murray W, Wright M H. 1981. The levenberg-marquardt method [J]. Practical Optimization, 136–137.
- Hamlin T D. 2004. The New Mexico Tech lightning mapping array [D]. Ph.D. dissertation, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro.
- Kawasaki Z I, Yamamoto K, Matsuura K, et al. 1994. SAFIR operation and evaluation of it's performance [J]. Geophys. Res. Lett., 21 (12): 1133– 1136.
- Qie X S, Wang Z C, Wang D F, et al. 2013. Characteristics of positive cloud-to-ground lightning in Da Hinggan Ling forest region at relatively high latitude, northeastern China [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 118 (24): 13393–13404, doi:10.1002/2013JD020093.
- Rustan P L, Uman M A, Childers D G, et al. 1980. Lightning source locations from VHF radiation data for a flash at Kennedy Space Center [J]. J. Geophys. Res.: Oceans (1978–2012), 85 (C9): 4893–4903.
- Savitzky A and Golay M J E. 1964.Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. Analytical Chemistry, 36 (8): 1627–1639.
- Shao X M, Holden D N, Rhodes C T. 1996. Broad band radio interferometry for lightning observations [J]. Geophys. Res. Lett., 23 (15): 1917–1920.
- 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.
- 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 rockettriggered lightning [J]. Atmospheric Research, 129–130: 58–66.
- Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. 2004. Accuracy of the Lightning Mapping Array [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 109 (D14), doi:10.1029/ 2004JD004549.
- 王东方, 郄秀书, 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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (1): 165– 174.
- 王东方, 宣越健, 刘继明, 等. 2011. 大兴安岭林区地闪放电特征的观测 与分析 [J]. 大气科学, 35 (1): 147–156. Wang Dongfang, Xuan Yuejian, Liu Jiming, et al. 2011. Analyses on the characteristic of cloud-to-ground lightning flash in Da Hinggan Ling forest region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1):147–156.

- 王宇, 郄秀书, 王东方, 等. 2014. 正地闪和负地闪预击穿脉冲序列的统 计分析与对比 [J]. 大气科学, 38 (1): 21-31. Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2014. Comparisons of preliminary breakdown pulse trains in positive and negative cloud-to-ground lightning flashes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 21-31.
- 武智君, 郄秀书, 王东方, 等. 2013. 大兴安岭林区负地闪电荷源的反演 [J]. 气象学报, 71 (4): 783–796. Wu Zhijun, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2013. Retrieval of the charge sources neutralized by negative cloud-to-ground lightning flashes in the Daxing'anling Forest region. [J]. Acta Meterologica Sinica (in Chinese), 71 (4):783–796.

Yoshida S, Biagi C J, Rakov V A, et al. 2010. Three-dimensional imaging of

upward positive leaders in triggered lightning using VHF broadband digital interferometers [J]. Geophys. Res. Lett., 37 (5), doi:10.1029/2009GL042065.

- 张义军, 孟青, 马明, 等. 2006. 闪电探测技术发展和资料应用 [J]. 应 用气象学报, 17 (5): 611–620. Zhang Yijun, Meng Qing, Ma Ming, et al. Development of Lightning Detection Technique with Application of Lightning Data [J]. Journal of Applied Meterological Science (in Chinese), 2006, 17 (5): 611–620.
- 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]. Science China Earth Sciences, 53 (4): 591–602.