

基于 VHF 辐射源短基线定位系统对闪电放电过程的研究*

曹冬杰¹⁾²⁾ 郟秀书^{1)†} 段树¹⁾ 宣越建¹⁾ 王东方¹⁾

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) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010 年 12 月 31 日收到; 2011 年 7 月 14 日收到修改稿)

利用闪电 VHF 辐射源短基线定位系统 2009 年东北大兴安岭地区的观测资料, 对正、负地闪和云闪放电过程中的 VHF 辐射源进行了定位研究. 根据闪电 VHF 辐射源的二维位置 (方位角和仰角) 随时间的演变特征, 结合同步观测的快、慢电场变化资料分析发现, 持续时间较长的地闪预击穿过程在云中的放电通道呈双层结构, 预击穿过程结束阶段的云内放电表现为反冲流光, 预击穿过程的平均速度在 10^4 m/s 量级. 预击穿过程为梯级先导的发展提供了必要的条件, 梯级先导从预击穿起始位置开始并向下发展, 产生较强的辐射, 平均速度在 10^5 m/s 量级. K 过程主要是流光沿之前已电离通道的传输. 正、负地闪回击阶段前后的放电特征有明显不同, 正地闪回击之后, 连续电流期间的较长时间的云内放电产生较强的 VHF 辐射. 对闪电在 125—200 MHz 频段范围的 VHF 辐射频谱特征的统计分析发现, 辐射能量呈现出幅值随频率增加而减小的趋势, 在通带范围上基本遵循 $f^{-2.9}$ 的衰减率递减.

关键词: 闪电, VHF 辐射源, 放电通道, 时间差定位, 短基线

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

1 引言

闪电甚高频辐射源定位技术是近 10 多年来发展起来的一种新型闪电探测技术, 能实现对闪电放电通道的高时空分辨率定位和跟踪. 20 世纪末, 作为一种全新的探测技术, 闪电 VHF 辐射源定位技术开始发展, 并被应用于闪电的观测与研究, 极大的增进了对云内放电现象的认识. 代表性的技术有: 窄带干涉仪定位技术^[1,2]、宽带干涉仪定位技术^[3,4]和多站时间差定位技术 LMA(lightning mapping array)^[5,6]等. VHF 辐射源定位结果说明, 较强的辐射主要来自于新的放电通道的开辟或者流光在导电性较差的已电离通道 (如: 电离通道经过较长的时间之后, 由于电荷的堆积再次被击穿) 内的传输过程, 这类击穿放电过程的发展速度较慢. 相反, 电流在导电性较好的电离通道中会以较快的速度传输, 产生的主要是 LF/VLF 辐射.

地闪回击过程产生的强大电流会对地面建筑物造成直接损坏, 其伴随的电磁辐射会在电子设备上形成感应过电压而造成间接损坏^[7,8], 因此, 地闪放电过程的研究对雷电防护有重要的实际意义. Morimoto 等^[9]和 Shao 等^[2]分别利用两站宽带干涉仪的三维定位技术和窄带干涉仪定位技术, 研究了地闪先导、K 变化、直窜先导和企图先导等过程辐射源的时空演变特征. Shao 等^[10]发现利用窄带干涉仪不能探测到正地闪过程中的下行正先导, 对双向先导的探测能力较弱, 探测到的正极性击穿放电主要来自于回击之后或者 K 过程中, 正流光沿之前负极性击穿过程已电离通道以回退的方式发展. 与窄带干涉仪相比, 宽带干涉仪测量的频谱范围很宽, 得到的电磁辐射信息较为丰富, 董万胜等^[11]对地闪的定位研究认为宽带干涉仪可以描述梯级先导通道的分叉现象, Yoshida 等^[12]观测到了人工触发闪电时上行正先导的发展过程.

* 林业公益性行业科研专项经费 (批准号: 200704027-1)、国家科技支撑计划 (批准号: 2008BAC36B03) 和国家自然科学基金重点项目 (批准号: 40930949) 资助的课题.

† E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

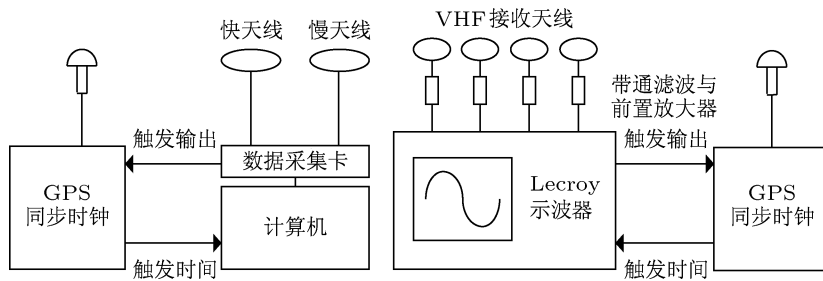


图1 闪电 VHF 辐射源短基线定位系统硬件集成示意图

云闪过程主要发生于云内, 由于云层的遮挡, 光学手段对云闪放电过程的观测能力较弱, 而 VHF 辐射源定位技术则为研究云闪发生发展过程提供了有效观测手段. Shao 等^[13]利用窄带干涉仪对云闪的定位分析, 揭示了云闪各阶段的放电通道特征. Akita 等^[14]利用宽带干涉仪对云闪的定位分析发现, 云内 K 过程对应的负反冲流光开始于前面正击穿放电通道的顶端, 沿已电离通道向起始放电位置发展, 与起始阶段的放电过程相比, K 过程的发展速度快两个数量级.

国内的雷电探测技术研究近几年也得到很快发展, 并已有的一些针对雷电过程的个例分析^[11,15,16], 但由于雷电放电过程的复杂性和地域性, 仍需要更多的个例分析与资料积累. 为了分析闪电放电发展过程的精细特征, 我们发展了基于短基线时间差方法的单站 VHF 辐射源定位系统, 并在东北大兴安岭地区进行了观测. 本文首先介绍定位系统的基本原理和构成, 然后根据野外试验观测获得的定位资料和闪电快、慢电场变化资料, 分别对正、负地闪的预击穿过程、先导过程、回击间过程和云闪的起始阶段、活跃阶段和结束阶段、以及 K 过程等的放电发展特征和 VHF 辐射频谱特征进行分析, 进一步研究闪电放电过程的物理机理.

2 仪器和观测实验

2.1 闪电 VHF 辐射源短基线定位系统

基于短基线时间差技术, 发展了单站 VHF 辐射源定位系统, 即闪电 VHF 辐射源短基线定位系统, 其硬件构成如图 1 所示. 该系统主要由四部分组成, 用于接收闪电 VHF 辐射信号的四个宽带平板天线, 工作带宽为 125—200 MHz; 用于信号放大与滤波的信号放大器与带通滤波器; 用于 VHF 辐射信号 A/D 采样、波形实时显示与存储的四通道示波器 Lecroy Wave Runner 104Xi; 用于电场变

化数据记录、波形显示与定位结果分析的工控机. 野外观测时, 四个天线分别置于正方形区域的四个顶点, 天线基线分别对应东西和南北方向, 基线长度为 10 m, 天线距地面高度为 2.8 m. 示波器采样率为 1 GS/s, 数据记录采用分段记录, 最多可记录 4000 段, 各段记录的时间长度为 2 μ s, 约 2000 个采样点.

系统基本工作流程如下, 天线感应到闪电放电过程产生的电磁辐射, 信号经前置放大器放大, 然后经带通滤波器滤波, 最后通过长度相等、频响特性一致的 50 m 长同轴电缆线接入示波器进行采集, 同时从 GPS 时钟获得快电场和 VHF 电磁辐射信号的准确触发时间, 明确 VHF 辐射与快电场波形在时间上的对应关系.

2.2 定位算法

与应用于宽带干涉仪的相位差定位算法^[17,18]相比, 时间差定位算法有如下两个优势, 得到的两路信号到达时间差唯一, 不会存在相位差定位算法中的边缘模糊问题; 对互相关功率谱分析中两路信号的圆周相关进行的滤波处理, 能够较为理想的减小噪声对定位精度的影响. 因此这里采用时间差定位算法, 如图 2(a) 所示, 假设辐射源与接收天线之间的距离远大于天线阵的基线长度, 入射电磁波可看成是平行传播的波束, 其与天线基线的夹角可根据信号到达相邻两个接收天线的的时间差 Δt_{12} 计算得到. 如图 2(b) 所示, A, B, C, D 表示四个天线的位置, P 为辐射源, P' 为辐射源 P 在地面的投影, 辐射源的方位角和仰角分别为 φ 和 θ . 将地面以上的半球形空间按方位角均分为四个区域, 分别对应直角坐标系的四个象限, 规定以天线 C 为空间中心, x 轴指向东, y 轴指向北. 根据信号到达基线 C, D 以及基线 C, B 的时间差, 计算辐射源的位置.

在计算辐射源位置时, 两个天线记录的波形峰值对应的记录时间的差值, 即为 VHF 信号到达天线的的时间差. 在已知到达时间差的情况下, 辐射源

位置的计算主要有两种方法: 双曲线法^[19]和正交基线法^[20], 前者适用于长基线定位系统, 后者适用于短基线定位系统. 根据正交基线法, 当辐射源 P 的方位角在 (0°—90°) 范围内时, 有

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\Delta t_{CB}}{\Delta t_{CD}} \right), \quad (1)$$

$$\theta = \arccos \left[\left(\frac{c}{d} \times \Delta t_{CD} \right)^2 + \left(\frac{c}{d} \times \Delta t_{CB} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

其中, c 为真空中的光速, d 为基线长度. 张泉等^[21]曾研制了类似的短基线时间差闪电辐射源探测系统, 并有初步定位结果, 与他们不同的是, 这里采用了宽带接收天线, 并提高了记录设备的采样速度与记录长度, 使记录到的 VHF 辐射信息更为丰富, 波形特征更为明显, 有利于对到达时间差方法中波形峰值的准确判定. 到达时间差的选取参考宽带干涉仪中的时延方法^[22], 对两天线接收的时域信号进行 16 倍插值处理, 然后求两路信号的互相关函数, 再对互相关函数作逆傅里叶变换得到两路信号的圆周相关, 寻找峰值点的位置, 并由此确定信号到达天线的的时间差, 实现利用程序自动解算辐射源的位置. 这里对两路信号的圆周相关进行了滤波处理, 减小了时间差的误差, 提高了定位精度.

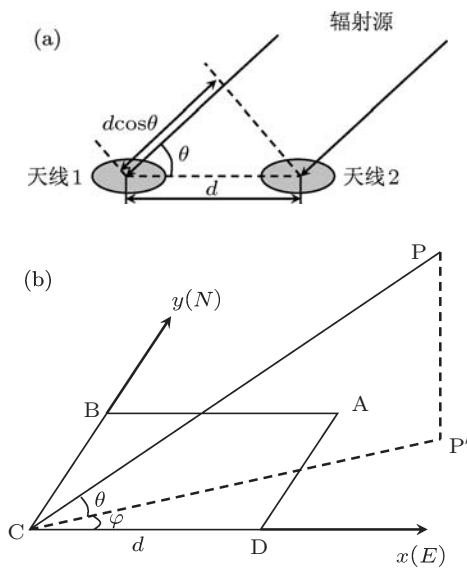


图2 时间差方法定位原理示意图 (a) 基本原理; (b) 辐射源方向计算

2.3 误差分析

由于 VHF 辐射源定位精度与系统误差、场地背景噪声等因素有关, 对定位误差的理论分析不能反映其真实值, 因此我们对定位误差进行了试验标定. 标定试验采用电火花模拟闪电辐射源, 将系统

定位得到的模拟源位置与已知的模拟源的真实位置作比较, 确定系统的定位误差. 由于试验场地条件的限制, 主要对方位角为 309°—325°(即辐射源相对于基线 AB 夹角为 35°—51°) 范围的辐射源位置进行了试验标定. 在进行标定之前, 首先对电缆长度不严格一致造成的时间延迟进行了测量, 并在定位计算中做了补偿.

试验标定得到的方位角误差与入射角 θ 的关系如图 3 所示, 误差随 θ 的增大而减小, 且保持在 0.7° 以下, 考虑到实际观测时闪电辐射源距离测站较远, 测量的闪电辐射源方位角误差应小于标定误差. 由于模拟源距离地面高约 10 m, 相对于天线阵列的仰角仅为 10°, 因此定位得到的仰角误差不可信. 图中只列出了方位角误差的分布情况, 误差的计算值是将 5 次定位结果求平均得到的. 可以看出, 误差最大值为 0.64°, 最小值为 0.04°.

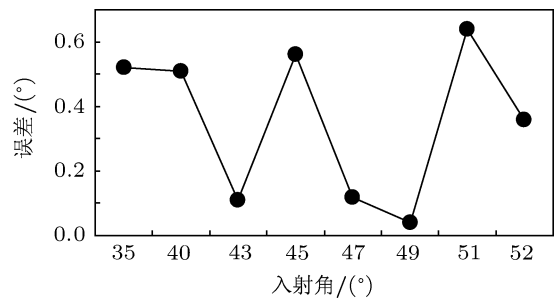


图3 系统标定误差曲线

2.4 观测场地和其他设备

利用自行研制的闪电 VHF 辐射源短基线定位系统, 2009 年夏季在东北大兴安岭地区 (50°18'E, 124°6'N, 390 masl) 开展了闪电观测试验. 观测站位于较为平坦的地区, 视野开阔, 周围基本无高大建筑物遮挡. 实验所用的其他辅助观测仪器还有: 用于测量雷暴电场大小和极性的大气平均电场仪, 测量范围可选, 包括 ±10 kV/m 和 ±100 kV/m 两个选择档, 响应时间为 0.1 s, 探测频段为 DC-1 kHz. 用于测量闪电电场变化的快天线闪电电场变化仪和慢天线闪电电场变化仪, 探测频段分别为 1 kHz—2 MHz 和 10 Hz—1 MHz, 时间常数分别为 0.1 ms 和 6 s, 闪电快、慢电场变化可用于判断闪电的类型和闪电的发展阶段. 用于提供信号触发时间的高精度 GPS 时钟, 授时精度为 50 ns.

3 定位结果

根据闪电 VHF 辐射源短基线定位资料和快、

慢电场变化资料, 分别对负极性地闪、正极性地闪和云闪的放电通道特征进行了分析, 并进一步讨论了放电过程可能的物理机理. 以往关于雷暴云电荷结构的观测研究表明, 虽然不同地区雷暴云中主负电荷区距地面的高度不同, 但海拔高度是一致的, 负电荷区处于 -10°C — 25°C 范围 [23,24]. 根据夏季气象探空资料得到的大气层温度随高度的变化情况, 估计东北大兴安岭地区雷暴云中主负电荷区距地面的高度为 5—7 km. 本节利用东北大兴安岭地区观测到的资料, 分别选取一次典型的负地闪、一次正地闪和一次云闪过程进行分析.

3.1 一次负极性地闪放电通道特征

如图 4 所示为 2009 年 7 月 19 日 15: 45: 35 东北大兴安岭地区观测到的一次多回击负地闪放电过程引起的快、慢电场变化波形图, 图中的幅值为相对值, 这里规定电场正向变化, 对应云中的负电荷被中和, 反之亦然 (下同). 以发生时间命名这次负地闪为 20090719154535, 放电过程共包含 5 次回击, 总持续时间为 500 ms. 根据声光差记录为 9 s, 估算地闪发生位置距测站的水平距离约为 3—4 km. 根据雷达强回波中心的位置判断, 这次地闪发生时刻, 雷暴云位于测站的正南和东南方向.

如图 5 所示为负地闪 20090719154535 快电场

变化和辐射源定位结果, 其中, 方位角 90° 对应于测站的正北方向. 为了使放电通道的显示更为直观, 这里将方位角变换到了 -180° 到 180° 范围. 辐射源颜色从蓝色到红色的变化表示位置随时间的演变. 规定横坐标时间零点对应快电场的触发时刻, 实际观测中设置预触发百分比为 20%, 可记录触发之前 200 ms 和触发之后 800 ms 的快、慢电场变化. 在快电场变化与辐射源定位图中, 快电场变化图下方的小短线表示有辐射源定位结果对应的时间点, 这样的显示方法可以更好地展示辐射源分布较为集中的时段对应的快电场变化, 从而可以对闪电放电的全过程进行研究. 定位点较为离散的主要原因是记录过程中, 快电场采用连续记录方式, 而短基线采用分段记录方式.

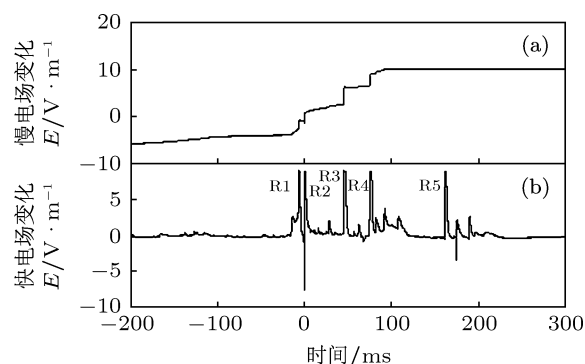
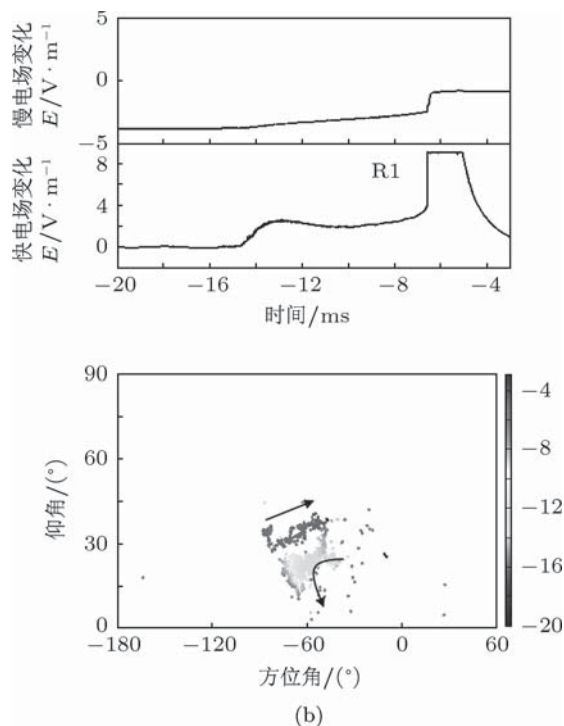
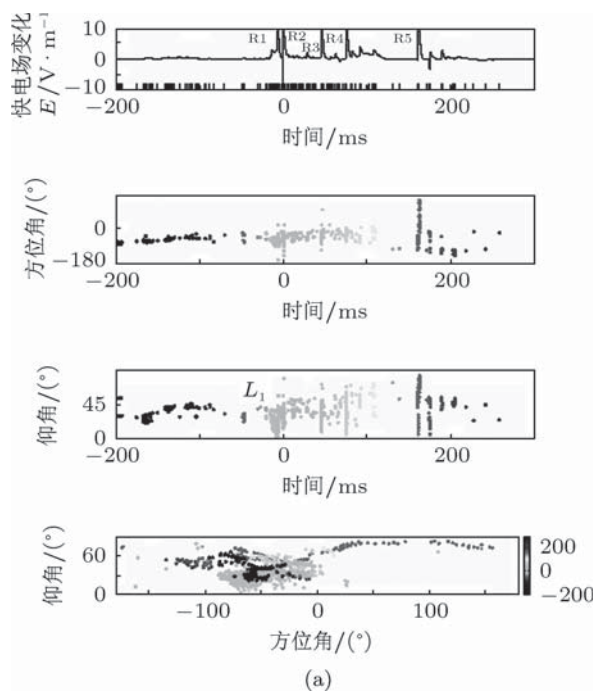


图 4 负极性地闪 20090719154535 快、慢电场变化波形图 (a) 慢电场变化 (后半部分饱和); (b) 快电场变化



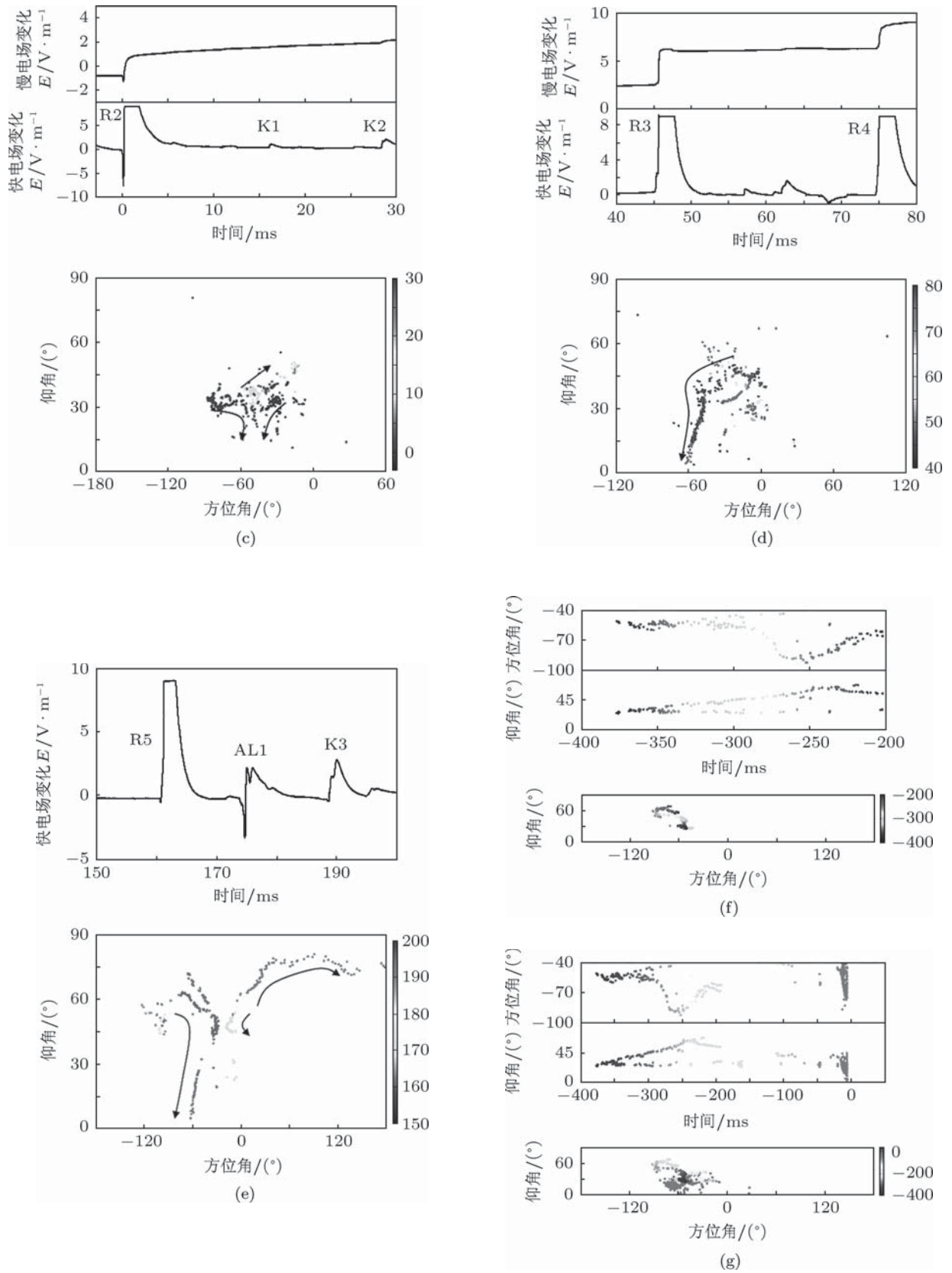


图5 负极性闪电 20090719154535 快电场变化波形与辐射源方位角仰角 (a) 地闪全过程; (b) 首次回击; (c) 继后回击 (第 2 次回击); (d) 第 3 次回击与第 4 次回击; (e) 第 5 次回击; (f) 预击穿过程开始阶段; (g) 预击穿 - 先导

图 5(a) 中 L1 所示位置为初始先导的起始位置, 仰角为 30° , 初始先导开始阶段, 快电场变化为正, 辐射源仰角增大. 由此判断, 负流光先向上发展至仰角为 40° . 之后, 负流光向下发展, 且在时间零点前 16 ms 时从仰角为 35° 位置以梯级形式向下发展, 初始先导过程的持续时间约为 45 ms, 估计通道长度约为 5—6 km, 初始先导的平均速度约为 1.3×10^5 m/s. 这与多站 VHF 辐射源定位网^[12]和窄带干涉仪^[16]观测的多次回击地闪的梯级先导速度基本一致. 如图 5(b) 所示, 首次回击之后的云内放电过程, 表现为负流光从仰角为 35° 位置, 沿先导过程电离的通道, 以回退的方式向起始位置发展, 本质为负极性反冲流光, 如图 5(c) 所示. 继后回击之前的梯级 - 直窜先导起始位置仰角为 35° , 与初始先导以梯级形式向下发展的起始位置相同, 通道长度与初始先导基本相同, 持续时间为 2 ms, 先导的平均速度约为 2.7×10^6 m/s. 这里未探测到先导接近地面时产生的辐射, 可能是因为先导伸出云底后, 沿首次回击已电离的导电性较好的通道发展, 产生的击穿放电较少. 继后回击之后有两次明显的 K 过程 K1 和 K2, 都发生在云内. 一部分沿云中已电离的通道发展, 由于通道的导电性较高, 主要以长距离流光的形式发展, 产生的 VHF 辐射较弱且辐射点不连续; 另一部分在云内开辟了新的通道, 产生较强的 VHF 辐射. 两次 K 过程 K1 和 K2 对应的快电场正向变化, 表现为负流光从主负电荷区向上传输, 仰角在 40° — 45° 之间变化. K 过程使闪电云内放电通道 (包括之前已电离和未电离的通道) 扩展延伸, 客观上影响了其后的先导类型. 经过约 45 ms 之后, 如图 5(d), (e), 出现的随后的 3 次先导过程均为直窜先导, 平均速度量级均为 10^6 m/s, 且 3 次先导过程均沿相同的先导通道接地. 可以看出, 第 3 次和第 4 次回击之前的先导过程起始位置抬高, 说明之前的放电使得放电通道向上延伸. 第 5 次回击之后有一次企图先导过程 AL1 和一次 K 过程 K3. K 过程 K3 表现为主负电荷区向上发展的负极性击穿放电. 企图先导 AL1 沿前面的先导通道发展, 往通道下部沉积电荷, 没有到达地面引起回击, 利用窄带干涉仪对企图先导的定位分析^[2]也得到了相同的结论.

如图 5(f) 所示, 为快电场触发时刻之前 400—200 ms 时间段预击穿过程定位结果的展开图, 由于预击穿阶段电场变化较弱, 因此未给出相应的快慢电场变化波形图. 预击穿过程的实际起始放电位置仰角为 25° , 方位角为 307° . 可以看出, 开

始阶段放电通道倾斜向上延伸一段后, 在时间零点前 350 ms 通道发生分叉, 分叉点仰角为 34° , 大致对应于云中主负电荷区与上部正电荷区之间的区域. 这之后, 一条通道继续倾斜向上发展, 另一条通道沿水平方向发展, 放电通道为双层结构. 向上发展的通道在水平方向上从东南向正南延伸, 沿水平方向发展的通道向正东延伸. 向上发展的通道经过约 150 ms 后, 仰角达到 70° , 预击穿过程的平均速度为 4.7×10^4 m/s. 在时间零点之前约 240 ms, 发生 K 型击穿放电, 具体表现是, 放电从上层通道顶部开始并以回退方式向预击穿过程起始放电位置发展, 此类放电可能激发了随后的初始先导过程.

如图 5(g) 所示, 初始先导开始于预击穿过程起始放电位置附近, 沿预击穿过程在云内开辟的放电通道发展, 由于预击穿过程与先导过程之间的时间间隔较长, 约为 20 ms, 因此通道的导电性较弱. 初始先导起始于沿之前已电离通道发展, 经过通道顶端后, 形成了新的通道, 发生大量的击穿放电, 产生了较强的 VHF 辐射. 由于采用了分段触发的方式, 在这 20 ms 的时间里没有定位到辐射源, 但不能肯定没有放电发生. 可以肯定的是, 预击穿过程为初始先导的发展提供了必要的条件.

图 5(a) 由上往下, 第一幅图为快电场随时间的变化, 第二幅图为辐射源方位角随时间的演变, 第三幅图为辐射源仰角随时间的演变, 第四幅图为辐射源仰角 - 方位角显示图. 图 5(b)—(e), 由上往下, 第一幅图为慢电场变化, 第二幅图为快电场变化, 第三幅图为辐射源仰角 - 方位角显示图. 图 5(f)—(g), 由上往下, 第一幅图为辐射源方位角随时间的演变, 第二幅图为辐射源仰角随时间的演变, 第三幅图为辐射源仰角 - 方位角显示图.

地闪 20090719154535 的主要特征是预击穿过程触发了梯级先导. 初始先导之后的 4 次先导过程均沿相同的放电通道向下发展至地面, 接地点的方位角均为 291° . 回击之后和先导之前的云内放电使得通道向上延伸, 未发生回击过程的多接地现象. 从快电场变化看, 回击过程快电场变化波形均饱和. 表 1 列出了各先导的持续时间和先导类型、以及发展的平均速度, 并根据快电场变化与 VHF 辐射, 将先导分为初始类型梯级先导、梯级 - 直窜先导和直窜先导三类.

定位结果中的辐射源位置较为分散, 主要与分段记录方式有关. Kawasaki 和 Mazur^[25], Mazur 和 Ruhnke^[26] 根据放电通道中的电荷分布情况, 对云内初始放电的物理过程进行了理论分析, 发现通

表 1 基于定位结果所得到的 5 次先导的时间、类型和速度特征

先导序号	持续时间/ms	相隔时间/ms	通道长度/km	平均速度/m·s ⁻¹	先导类型
L1	45.73	—	5—6	1.3×10 ⁵	梯级
L2	2.2142	4.6	5—6	2.7×10 ⁶	梯级-直窜
L3	1	45.1	4—5	5×10 ⁶	直窜
L4	2.04	28.93	4—5	2.5×10 ⁶	直窜
L5	1.17	85.54	5—6	4.2×10 ⁶	直窜

道内的电流与通道长度呈线性相关, 随通道长度的增加而增大, 通道的导电性影响了通道的发展, 使得通道的发展停止或减慢, 从而导致辐射强度降低, 闪电放电过程的强度有所不同^[27]. 这可能是导致辐射源较为离散, 探测到的辐射源较少的一个原因.

3.2 一次正极性地闪放电通道特征

图 6 为 2009 年 7 月 6 日 14: 04: 46 一次正极性地闪放电过程引起的快、慢电场变化波形图, 以发生时间命名这次正地闪为 2009070614044. 可以看出整个地闪仅有 1 次回击过程, 回击之后有较长时间的连续电流过程, 持续时间约为 80 ms. 根据声光差记录为 29 s, 估算地闪发生位置距测站的水平距离约为 10 km.

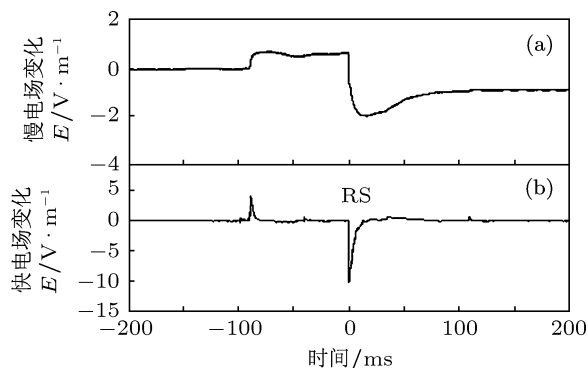


图 6 正极性地闪 20090706140446 快慢电场变化波形图 (a) 慢电场变化; (b) 快电场变化

图 7(a) 所示为正地闪 20090706140446 全过程快电场变化和辐射源时空分布, 时间长度为 500 ms. 在正先导过程开始之前, 负极性放电通道形成一段时间后, 辐射源分布离散, 对应于流光在通道中的反复传输, 保持了通道具有较高的导电性. 在正先导开始前, 发生沿已电离通道反向发展的击穿放电, 这之后的辐射源持续向下发展, 穿出云底后即以为梯级形式发展的正先导. 同时, 还发生从主负电荷区向上发展的击穿放电.

图 7(b) 所示为预击穿阶段对应的快、慢电场变化和辐射源定位结果, 时间长度为 20 ms. 预击穿过程开始于回击前约 100 ms, 起始放电位置仰角约

为 30°, 起始放电表现为负流光从主负电荷区向下发展. 负流光到达下部正电荷区后, 快电场为正向变化, 且快电场波形上叠加了很多正脉冲, 辐射源仰角从 25° 减小为 5°, 对应于负流光在下部正电荷区沿水平方向远离测站发展, 持续时间约为 15 ms, 由此估计预击穿过程的平均速度为 3.8×10⁵ m/s. 关于正先导起始过程的解释, 张广庶等^[15] 根据多站 VHF 辐射源定位资料分析认为, 发生在正先导之前的负击穿放电过程消耗发展区域内正电荷的同时, 在起始放电位置积累了大量的正电荷, 提高了起始放电位置的正电位, 为随后的正极性击穿放电提供了条件. 从这里的定位资料来看, 预击穿过程中虽然有一些负极性击穿放电, 但正先导可能是由沿负极性放电通道以回退形式发展的正极性反冲流光触发.

如图 7(c) 所示, 由于正极性击穿放电产生的辐射很弱, 并未探测到明显的正先导, 但肯定存在向下发展的正先导, 为回击过程开辟了放电通道. 回击过程快电场波形饱和, 回击后的放电产生了一些 VHF 辐射, 放电过程较为复杂, 持续时间约为 2 ms, 仰角在 3°—40° 之间变化, 主要是放电起始位置附近向上和向下发展的击穿放电, 以及回击通道与周围空气之间持续时间极短的空气击穿放电.

正地闪 2009070614044 的主要特征是, 回击前的预击穿过程以负极性击穿放电为主, 负流光向下发展至下部正电荷区后, 沿水平方向传输一段距离, 然后正反冲流光引发正先导向地面发展. 回击后有持续时间较长的连续电流过程, 伴随有较强的云内放电.

3.3 一次云闪放电通道特征

图 8 所示为 2009 年 7 月 6 日 01: 19: 55 一次云闪引起的快、慢电场变化, 以发生时间命名这次云闪为 20090706011955, 整个云闪持续时间为 800 ms. 声光差记录为 20 s, 估算闪电发生位置距测站的水平距离约为 7 km.

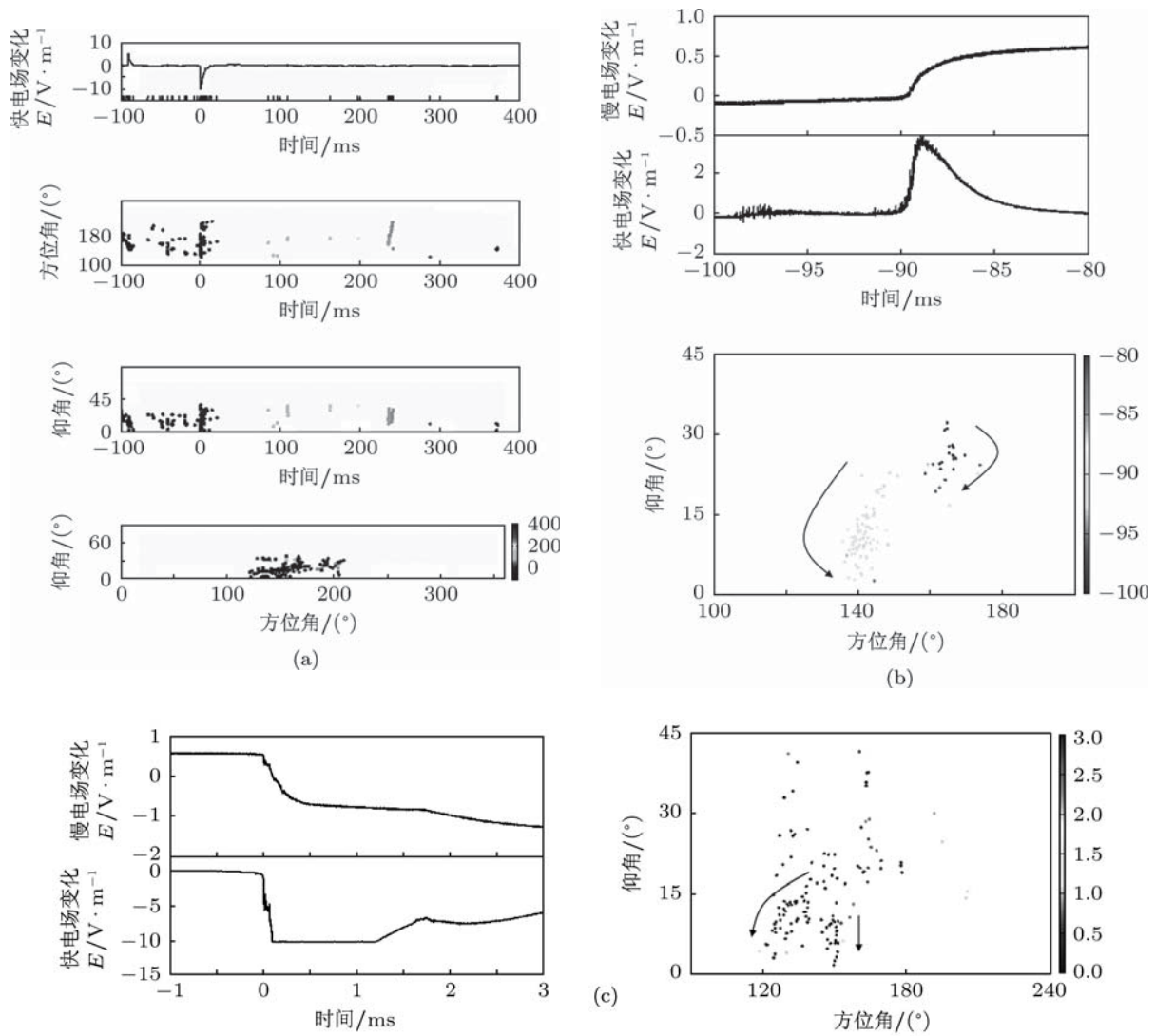


图7 正极性地闪 20090706140446 快电场变化波形与辐射源方位角仰角 (图中说明同图 5) (a) 地闪全过程; (b) 预击穿; (c) 先导-回击

如图 9(a) 所示, 云闪 20090706011955 发生在测站北偏东方向, 起始放电位置仰角约为 35° , 距离地面高度约为 4.5 km.

如图 9(b) 所示, 云闪起始阶段快电场波形表现为双极性脉冲序列, 以正双极性脉冲开始, 中间出现几个幅值较大的双极性脉冲, 最后以正脉冲结束, 脉冲序列的持续时间约为 5 ms. 其中, 正双极性大脉冲宽度为 $79 \mu\text{s}$. 根据辐射源定位结果, 双极性脉冲序列对应于从主负电荷区向下部正电荷区发展的负流光, 辐射源仰角从 35° 减小为 10° , 对应的快电场变化为正, 可能是负流光到达下部正电荷区后, 在下部正电荷区沿水平方向远离测站发展. 在水平方向上从东北向西北延伸, 辐射源方位角在 65° — 90° 之间变化, 通道长度约为 2 km, 平均速度约为 $3.6 \times 10^5 \text{ m/s}$, 这与 Shao 等 [13] 对云闪初始放电速度的估计值一致, 起始阶段的放电增大了放

电通道及周围区域的电离程度.

如图 9(c) 所示, 云闪活跃阶段辐射源仰角主要分布在 30° — 70° 范围, 对应的快电场负向变化, 主要是从主负电荷区向下发展的负极性击穿放电, 输送大量负电荷. 云闪活跃阶段的 K 过程 K1 持续时

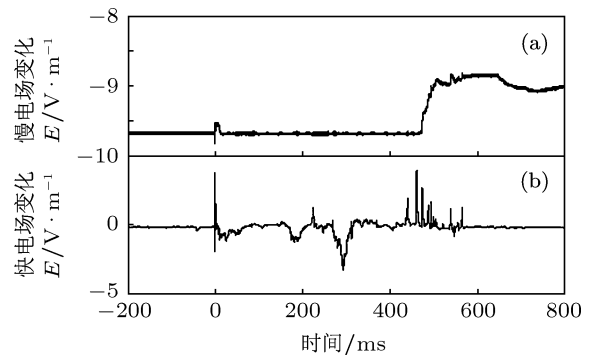


图8 云闪 20090706011955 快慢电场变化波形图 (a) 慢电场变化; (b) 快电场变化

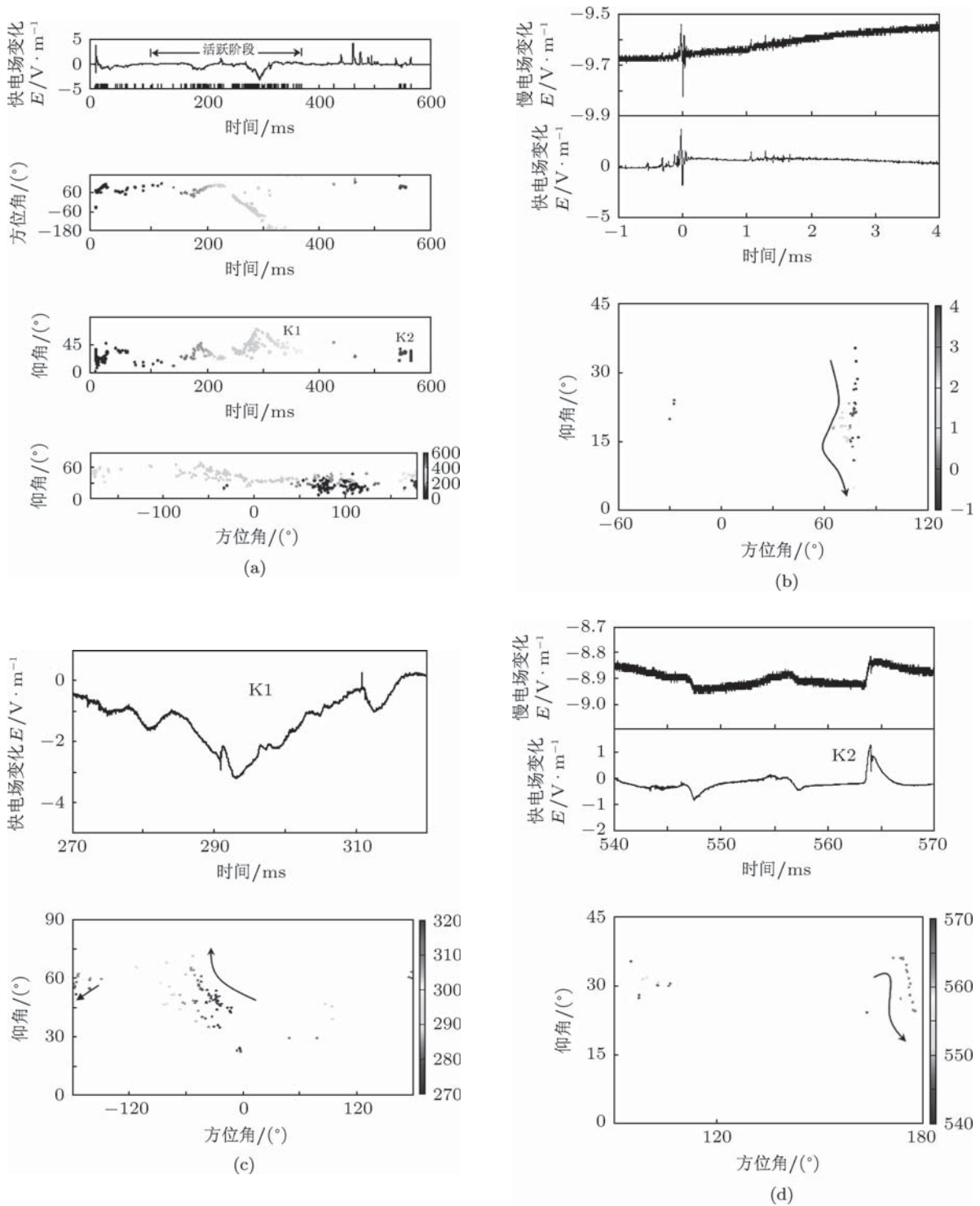


图9 云闪 20090706011955 快电场变化与辐射源定位结果 (a) 快电场变化与辐射源定位结果; (b) 起始阶段; (c) 活跃阶段; (d) 结束阶段 (图中说明同图 5)

间为 20 ms, 通道长度约为 3—4 km, 平均速度约为 1.7×10^5 m/s. 由于慢电场变化超出测量范围, 因此这里只给出了快电场变化波形.

如图 9(d) 所示, 云闪结束阶段辐射源仰角主要分布在 20° — 40° 范围, K 过程 K2 对应的电场变化为正, 主要是负流光沿起始阶段已电离的流光通

道, 以负反冲流光的形式向下发展, 持续时间为 1 ms, 通道长度约为 2—3 km, 平均速度约为 2.4×10^6 m/s. Shao 等 [13] 对云闪结束阶段 K 过程 K2 的速度估计值为 10^6 — 10^7 m/s, 与这里的结果基本一致. 可以看出, 云闪结束阶段 K 过程 K2 的发展速度比起始阶段的流光发展速度大两个量级, Akita 等 [14]

利用两站宽带干涉仪对云闪的观测研究也得到相同的结果,认为云闪结束阶段的 K 过程是由之前沿起始阶段已电离通道反向发展的正反冲流光引发的负反冲流光.

4 闪电的宽带 VHF 辐射频谱特征

闪电 VHF 辐射源短基线定位系统具有较宽的带宽,因此我们对 125—200 MHz 频段范围的能量谱密度进行了计算.对分析的时序信号加 Hanning 窗来控制频谱泄露,能量谱密度的计算公式如下:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi wt}, \quad (3)$$

$$E(w) = |X(w)|^2, \quad (4)$$

其中, $E(w)$ 为能量谱密度的频域分布值, $x(t)$ 表征 VHF 辐射时序信号, $X(w)$ 表征 VHF 辐射时序信号的傅里叶变换.由于多种因素的影响以及天线本身的探测能力,实测的 VHF 辐射信号能量谱是衰减后的能量谱,只能根据实测 VHF 辐射信号能量谱的变化情况反映实际的信号能量谱变化特征,这里给出的能量谱密度为相对值.根据辐射谱幅度与距测站的距离呈反比的关系,将计算得到的各次闪电的能量谱密度归一化计算至 50 km 进行对比分析.其中 D 为由声光差得到的各次闪电发生位置与测站间的距离,单位为 km.由 (5) 式将能量谱密度的单位转换为 dB:

$$10 \times \log [E(w)]. \quad (5)$$

下面分别对上述三次放电过程在 125—200 MHz 频段范围的 VHF 辐射频谱特征进行讨论.图 10 为负地闪 20090719154535 的 VHF 辐射频谱特征,如图 10(a) 所示,预击穿阶段的辐射能量随频率增加平缓下降.回击阶段的能量强度分布,主要分析回击瞬间及其后 10—20 ms 时间段内能量较强的 VHF 辐射信号.首次回击阶段辐射能量随频率增加缓慢下降,与预击穿阶段的辐射能量变化基本相同.继后回击和第 3 次回击前的先导过程产生的 VHF 辐射能量较高,且各次回击之前的先导过程辐射能量均随频率增加持续衰减.这可能是因为在这两次先导发展过程中,发生较多的小尺度击穿放电过程,如先导通道导电性较差或者先导发展过程产生了较多的分枝,以及云内新的放电通道的形成等.蓝渝等^[28]发现负地闪回击阶段在 0.1—40 MHz 上频谱分布,也具有辐射强度随频率增加,幅值减小的特征.如图 10(b) 所示,前四次回击阶段辐射能量均随频率增加持续衰减,第五次回击阶段

辐射能量出现明显的波动.如图 10(c) 所示, K 过程 K1 辐射能量出现明显的波动,其余各次 K 过程辐射能量均随频率增加持续衰减,说明 K 过程的放电尺度变化较为复杂.辐射能量变化特征反映了地闪各阶段不同放电过程的击穿放电尺度和放电机理可能有所不同.

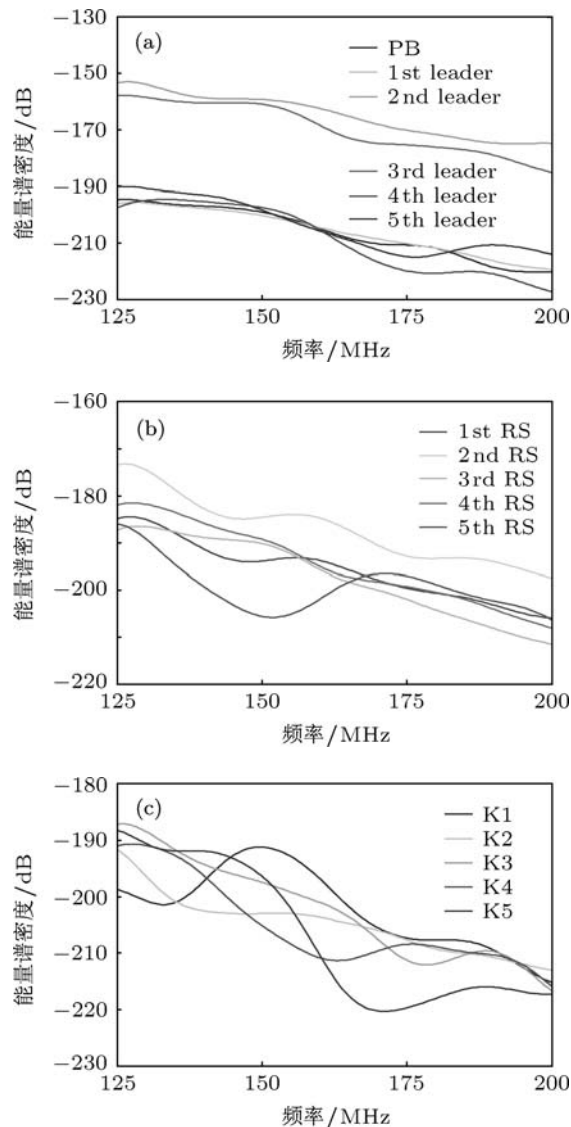


图 10 负性地闪 20090719154535 不同放电阶段在 125—200 MHz 的辐射能量谱密度 (a) 预击穿和先导; (b) 回击阶段; (c) K 过程

图 11 所示为正地闪 20090706140446 的 VHF 辐射强度的频谱分布.图 11(a) 所示为预击穿阶段、先导过程和回击阶段辐射能量的频域分布,预击穿阶段的辐射能量随频率增加平缓下降,与负地闪相比,预击穿阶段辐射能量较高,正地闪预击穿阶段的放电发生在两个较大电荷区之间,持续时间较长,开辟了较长的放电通道,放电发展经过的路径的电导率普遍较低,主要以小尺度的击穿放电为

主,可能是其辐射能量较高的主要原因. 测量频段范围内,正先导过程辐射能量远小于预击穿过程,与负地闪首次回击之前的梯级先导相似. 回击阶段辐射能量较强,甚至高于预击穿阶段,结合图 7(c)给出的辐射源定位结果来看,其主要与回击之后云内发生的大量击穿放电产生. 如图 11(b)所示,回击之后的第一次 K 过程辐射能量出现明显的波动,其余各次 K 过程辐射能量均随频率有一定波动,但总体趋势都是逐渐减小, K 过程辐射频谱特征的变化,主要与放电通道的电导率变化较为复杂有关.

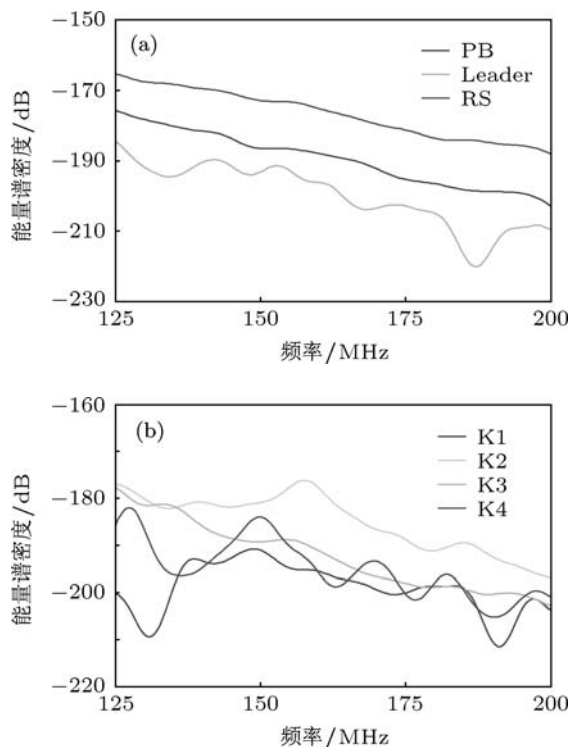


图 11 正性地闪 20090706140446 不同放电阶段在 125—200 MHz 的辐射能量谱密度 (a) 预击穿、先导和回击; (b) K 过程

图 12 所示为云闪过程 20090706011955 各阶段的 VHF 辐射强度的频谱分布. 云闪起始阶段和活跃阶段辐射能量变化特征相差不大,均随频率增大而缓慢减小,起始阶段辐射能量略高于活跃阶段. 起始阶段和活跃阶段的划分界限不是很明确,很多研究中,都将云闪分为活跃阶段和结束阶段分析. 蓝渝等^[28]分析发现云闪起始阶段在 0.1—40 MHz 上频谱分布,也具有辐射强度随频率增加,幅值减小的特征. 云闪结束阶段的辐射能量有一些波动,但变化幅度不大. 两次 K 过程辐射能量均较低. 云闪起始阶段,云内一般会形成较长的垂直通道,如图 9(a)所示,云闪起始阶段逐渐形成仰角范围为 30°—60° 的垂

直通道,其后在云闪的活跃和结束阶段,云内放电过程主要以长距离放电为主. Rust 等^[29]对电场探空资料与 LMA 定位资料进行了综合分析,认为闪电引起的电荷沉积增大了雷暴云电荷结构的复杂程度. 可以认为,云闪放电特征与雷暴云电荷结构有关,云闪放电也会反作用于雷暴云而影响雷暴云中的电荷结构.

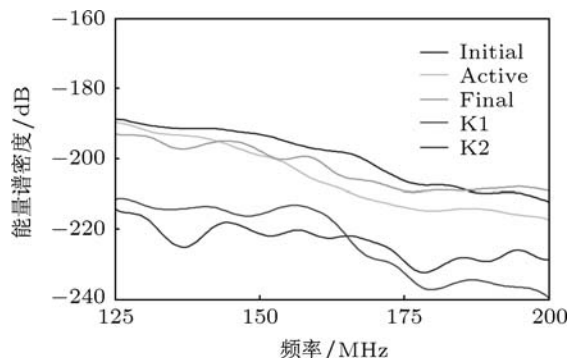


图 12 云闪 20090706011955 不同放电阶段在 125—200 MHz 的辐射能量谱密度

此外,我们对大兴安岭地区观测的 35 次负地闪、6 次正地闪和 28 次云闪的 VHF 辐射频谱特征进行了统计分析,发现能量谱密度随频率增加而减小,在通带范围上基本遵循 $f^{-2.9}$ 的衰减率递减.

5 结论与讨论

本文介绍了自行研制的闪电 VHF 辐射源短基线定位系统,并结合快、慢天线闪电电场变化仪等观测资料,对闪电放电过程进行了研究. 根据宽带 VHF 辐射观测资料,对闪电放电过程在 125—200 MHz 频段范围的辐射频谱特征进行了分析,获得了正、负地闪和云闪的详细放电特征,主要结论如下.

1) 负地闪预击穿阶段的放电为梯级先导的发展提供了必要的条件,平均速度量级为 10^4 m/s. 梯级先导从预击穿起始位置开始并向下发展,产生较强的辐射,平均速度量级为 10^5 m/s. 随后的先导过程均沿首次先导开辟的通道接地. 回击间的 K 过程主要是负流光沿之前已电离的通道的传输,以回退的方式向起始放电区域的快速发展,表现为流光的多次传输.

2) 正、负地闪回击过程前后的放电特征有明显区别. 正地闪预击穿过程结束阶段的放电,可能是沿之前负击穿过程电离的通道反向发展的

正极性反冲流光. 负地闪首次回击之前的初始梯级先导产生较强的 VHF 辐射, 正地闪回击之前的正先导产生的 VHF 辐射强度较弱. 正地闪回击之后产生大量的 VHF 辐射, 放电过程与负地闪相比较为复杂,

主要来自于起始放电位置附近向上或向下发展并与回击通道连接的放电过程, 以及放电通道与周围空气之间的击穿放电.

3) 这里分析的云闪过程较为特别, 云闪起始阶段, 负流光从主负电荷区向下发展, 且在下部正电荷区沿水平方向发展. 起始阶段对应的快电场波形表现为双极性脉冲序列. 起始阶段的放电过程增大了放电通道及通道周围区域的电离程度, 平均速度量级为 10^5 m/s. 活跃阶段从主负电荷区向下部正电荷区输送大量的负电荷, K 过程的平均速度量级为 10^5 m/s. 负流光沿之前已电离通道沿水平方向远离测站发展, 平均速度量级为 10^6 — 10^7 m/s.

4) 正、负地闪和云闪的 K 过程在 125—200 MHz 频段范围的 VHF 辐射频谱特征, 表现为较复杂的变化, 其他各阶段的辐射能量强度均随频率增大而缓慢减小. 统计发现, 闪电辐射能量在通带范围上基本遵循 $f^{-2.9}$ 的衰减率递减.

由以上对闪电初始放电阶段的定位分析可以看出, 大兴安岭地区雷暴云可能存在较大的下部正电荷区. 由于在 VHF 频段正极性击穿的辐射较弱, 本文探测到的辐射大多来自于负极性击穿放电, 无法确切知道是否有正极性击穿放电产生. 将来希望结合人工引发雷电技术, 实现对雷电的近距离测量, 从而同时了解正极性击穿和负极性击穿的传播形式和物理机理, 并通过两站定位观测, 实现对闪电辐射源的三维定位研究. 在三维定位的基础上, 结合电场、磁场和光学观测等手段, 对闪电放电通道的发展特征与雷暴云的电荷结构特征进行更为详细的分析与研究.

- [1] Rhodes C T, Shao X M, Krehbiel P R, Thomas R J, Hayenga C O 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 13059
- [2] Shao X M, Krehbiel P R, Thomas R J, Rison W R 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 2749
- [3] Shao X M, Holden D N, Rhodes C T 1996 *Geophys. Res. Lett.* **23** 1917
- [4] Kawasaki Z I, Mardiana R, Ushio T 2000 *Geophys. Res. Lett.* **27** 3189
- [5] Rison W R, Thomas R J, Krehbiel P R, Hamlin T, Harlin J 1999 *Geophys. Res. Lett.* **26** 3573
- [6] Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W R, Hunyady S J, Winn W P, Hamlin T, Harlin J 2004 *J. Geophys. Res.* **109** D14207
- [7] Zhao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese) [赵阳, 鄯秀书, 孔祥贞, 张广庶, 张彤, 杨静, 冯桂力, 张其林, 王东方 2009 物理学报 **58** 6616]
- [8] Yang J, Qie X S, Wang J G, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [杨静, 鄯秀书, 王建国, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [9] Morimoto T, Kawasaki Z I, Ushio T 2005 *Atmos. Res.* **76** 445
- [10] Shao X M, Rhodes C T, Holden D N 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 9601
- [11] Dong W S, Liu X S, Zhang Y J, Zhang G S 2002 *Science in China D* **32** 81 (in Chinese) [董万胜, 刘欣生, 张义军, 张广庶 2002 中国科学 D **32** 81]
- [12] Yoshida S, Biagi C J, Rakov V A, Hill J D, Stapleton M V, Jordan D M, Uman M A, Morimoto T, Ushio T, Kawasaki Z I 2010 *Geophys. Res. Lett.* **37** L05805
- [13] Shao X M, Krehbiel P R 1996 *J. Geophys. Res.* **101** 26641
- [14] Akita M, Nakamura Y, Yoshida S, Morimoto T, Ushio T, Kawasaki Z, Wang D 2010 *J. Geophys. Res.* **115** D07106
- [15] Zhang G S, Wang Y H, Qie X S, Zhang T, Zhao Y X, Li Y J, Cao D J 2010 *Science in China D* **40** 523 (in Chinese) [张广庶, 王彦辉, 鄯秀书, 张彤, 赵玉祥, 李亚珺, 曹冬杰 2010 中国科学 D **40** 523]
- [16] Zhang G S, Zhao Y X, Qie X S, Zhang T, Wang Y H, Chen C P 2008 *Science in China D* **38** 1167 (in Chinese) [张广庶, 赵玉祥, 鄯秀书, 张彤, 王彦辉, 陈成品 2008 中国科学 D **38** 1167]
- [17] Mardiana R, Kawasaki Z I 2000 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **49** 376
- [18] Mardiana R, Kawasaki Z I 2000 *Geophys. Res. Lett.* **27** 2917
- [19] Proctor D E 1971 *Geophys. Res. Lett.* **76** 1478
- [20] Taylor W L 1978 *J. Geophys. Res.* **83** 3575
- [21] Zhang Q, Qie X S, Zhang G S 2003 *Plateau Meteorology* **22** 226 (in Chinese) [张泉, 鄯秀书, 张广庶 2003 高原气象 **22** 226]
- [22] Qiu S, Zhou B H, Shi L H, Dong W S, Zhang Y J, Tao S C 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D18211
- [23] Takahashi T 1978 *J. Atmos. Sci.* **35** 1536
- [24] Williams E R 1989 *J. Geophys. Res.* **94** 13151
- [25] Kawasaki Z I, Mazur V 1992 *J. Geophys. Res.* **97** 12935
- [26] Mazur V, Ruhnke L 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 12913
- [27] Yuan P, Liu X S, Zhang Y J, Xie L Y, Dong C Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2495 (in Chinese) [袁萍, 刘欣生, 张义军, 颜录有, 董辰钟 2002 物理学报 **51** 2495]
- [28] Lan Y, Zhang Y J, Lv W T, Zheng D, Chen S D 2009 *Plateau Meteorology* **28** 05 (in Chinese) [蓝渝, 张义军, 吕伟涛, 郑栋, 陈绍东 2009 高原气象 **28** 05]
- [29] Rust W D, MacGorman D R, Bruning E C, Weiss S A, Krehbiel P R, Thomas R J, Rison W, Hamlin T, Harlin J 2005 *Atmos. Res.* **76** 247

Lightning discharge process based on short-baseline lightning VHF radiation source locating system*

Cao Dong-Jie^{1)2)†} Qie Xiu-Shu¹⁾ Duan Shu¹⁾ Xuan Yue-Jian¹⁾
Wang Dong-Fang¹⁾

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

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 31 December 2010; revised manuscript received 14 July 2011)

Abstract

A lightning VHF radiation source location system based on short-baseline technology is used to study the location of VHF radiation source in the lightning discharge process. The observation was conducted in Daxing'anling during summer of 2009. Positive cloud-to-ground (CG) lightning, negative CG lightning, and intra-cloud (IC) lightning are analyzed based on the locating results and simultaneous electric field changes. The long lasting preliminary breakdown process of CG flash appears as two-level structure of discharge channel in cloud. There are obvious recoil streamers during the final stage of preliminary breakdown process. The preliminary breakdown process propagates at a speed of about 10^4 m/s. The preliminary breakdown seems to be necessary for the initiation of stepped leader. The stepped leader starts from the source region of preliminary breakdown and propagates downwards. The stepped leader produces intensive VHF radiation. The propagation speed of stepped leader is about 10^5 m/s. The K process is caused by the streamers propagating backwards and forwards along the electrified channel. Characteristics of discharge processes before and after the return stroke of positive CG flash are different from those of negative CG flash obviously. During long continuing current after the return stroke of positive CG flash, discharges in cloud produce intensive VHF radiation. The energy spectrum of the VHF radiation produced by lightning is studied statistically. It is found that the energy spectrum of VHF radiation decreases quickly with the frequency at a rate of about $f^{-2.9}$ between 125 and 200 MHz.

Keywords: lightning, VHF radiation source, discharge channel, time of arrival locating technique, short baseline

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

* Project supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. 200704027-1), the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2008BAC36B03), and Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40930949).

† E-mail: qjex@mail.iap.ac.cn