



## 一次对地转移电荷极性两次反转的人工引发雷电特征及反转机制分析

唐国瑛 孙竹玲 蒋如斌 李丰全 刘明远 刘昆 郗秀书

## Characteristics and mechanism of a triggered lightning with two polarity reversals of charges transferred to ground

Tang Guo-Ying Sun Zhu-Ling Jiang Ru-Bin Li Feng-Quan Liu Ming-Yuan Liu Kun Qie Xiu-Shu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 189201 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200374

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200374>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

基于正交传播算子的闪电宽带甚高频辐射源定位方法研究

Broadband very high frequency localization of lightning radiation sources based on orthogonal propagator method

物理学报. 2019, 68(16): 165202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190522>

闪电双向先导理论及观测:极性不对称、不稳定及间歇性

Theory and observation of bidirectional leader of lightning: Polarity asymmetry, instability, and intermittency

物理学报. 2018, 67(20): 205201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181079>

球几何中辐射源粒子抽样方法的改进

Modification of method of sampling radiation source particle in spherical geometry

物理学报. 2020, 69(11): 119501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200024>

甚高频激发的容性耦合Ar+O<sub>2</sub>等离子体电负特性研究

Electronegativity of capacitively coupled Ar+O<sub>2</sub> plasma excited at very high frequency

物理学报. 2017, 66(18): 185202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.185202>

双频双波束加热电离层激发甚低频/极低频辐射理论分析

Theory of very low frequency/extra low frequency radiation by dual-beam beat wave heating ionosphere

物理学报. 2017, 66(1): 019401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.019401>

双色高频激光作用下原子低阶次谐波的理论研究

Theoretical investigation of atomic low-order harmonics under irradiation of two high frequency laser pulses

物理学报. 2018, 67(3): 033201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172129>

# 一次对地转移电荷极性两次反转的人工 引发雷电特征及反转机制分析\*

唐国瑛<sup>1)2)</sup> 孙竹玲<sup>2)†</sup> 蒋如斌<sup>2)</sup> 李丰全<sup>2)3)</sup>  
刘明远<sup>2)3)</sup> 刘昆<sup>1)</sup> 郅秀书<sup>2)3)</sup>

1) (成都信息工程大学电子工程学院 (大气探测学院), 成都 610225)

2) (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)

3) (中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

(2020年3月13日收到; 2020年5月27日收到修改稿)

利用闪电甚高频干涉仪动态成像结果, 并结合通道底部电流、电场和光学观测资料对一次罕见的、对地转移电荷极性反转两次的双极性人工引发雷电放电特征进行了详细研究, 首次观测到直接导致极性反转的云内击穿放电过程, 探讨了对地转移电荷极性两次反转的物理机理. 结果发现, 此次闪电无回击过程、初始连续电流阶段对地转移电荷极性经历了负-正-负的两次反转, 转移电荷量分别约 $-40.0\text{ C}$ ,  $+13.3\text{ C}$ 和 $-1.0\text{ C}$ . 负极性初始连续电流衰减过程中, 一支击穿空气的负先导起始于已电离的正先导分支通道上并形成悬浮通道, 水平发展 $28.816\text{ ms}$ 后, 接地主通道上发生负极性击穿连接到了悬浮通道末端正电荷聚集处或双向发展的悬浮通道的正极性端, 随后对地转移电荷极性快速反转为正. 负先导熄灭后, 对地转移电荷极性缓慢反转为负. 击穿空气的负先导连接到接地主通道和持续发展的正先导是此次双极性闪电对地转移电荷极性发生两次反转的重要原因. 而负先导的起始, 与正先导多分支同时发展引起的先导通道和环境电势分布差异密切相关.

**关键词:** 先导, 双极性闪电, 人工引雷, 甚高频辐射源定位

**PACS:** 92.60.Pw, 42.68.Ay

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200374

## 1 引言

雷电是大自然中发生的一种强发光、长距离的瞬时放电现象. 地闪是一种云对地的雷电放电类型, 通常向地面传输单一极性的电荷. McEachron<sup>[1]</sup>于1939年首次报道了在美国帝国大厦上观测到的一种特殊的地闪放电类型, 其闪电电流的极性存在反转特征, 表明这类特殊的地闪能够先后向大地释放两种极性相反的电荷. 随后, 在全球不同地区也观测到了类似的双极性闪电, 其主要发生于高塔、高建筑物等顶端始发的上行地闪及人工引发雷电

中<sup>[2-8]</sup>, 自然下行地闪中也有少量发现<sup>[9]</sup>. Rakov<sup>[10]</sup>指出相较于普通的正、负地闪, 双极性地闪所占比例较低, 但随着针对上行闪电的观测时长及样本数量的增多, 双极性闪电发生的概率可能会进一步增加. Watanabe等<sup>[11]</sup>统计了2000年—2018年在高塔顶端始发的823次上行闪电电流波形, 其中137次(17%)为双极性.

双极性闪电对地转移电荷极性反转可发生于闪电初始连续电流、回击等不同的放电物理阶段, 还可能发生极性的多次反转<sup>[8,10,11]</sup>. 其类型的多样性意味着闪电放电行为及云内电荷结构的复杂性. 因此, 对双极性闪电放电过程的研究, 有助于揭示

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41875008, 41775012, 41630425) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sunzhuling@mail.iap.ac.cn

雷暴云内电荷结构对正、负先导放电的影响规律特征,对雷电科学防护也有重要的实际价值.

早期对双极性闪电的探测手段主要为传统的电场、电流及云外放电通道的光学观测,Chen 等<sup>[12]</sup>在国内记录到一例自然下行双极性闪电,包含 1 次正回击和 5 次负回击,正回击的峰值电流为 142 kA. Saba 等<sup>[13]</sup>在多例回击为不同极性的下行双极性闪电的光学资料中发现负回击产生前,在已熄灭的正先导分叉通道上存在倒回式发展的负极性反冲先导 (recoil leader, RL),推测正极性分支通道在正回击发生前已与主通道截断,未参与之前的正回击放电,而反冲先导反向传播连接到原有正回击通道,并继续向地面传播产生负回击,形成同一接地通道的双极性闪电, Saraiva 等<sup>[14]</sup>验证了上述推测并观测到反冲先导在发展过程中可能分叉,产生新的闪电通道并接地,使得双极性闪电的极性反转是在不同通道中完成的. Tian 等<sup>[15]</sup>指出正回击之后的反冲流光过程在维持云中先导网络和回击通道间的连接起着至关重要的作用,促使了负梯级-箭式先导的形成并最终产生了负回击.

尽管通过光学观测对下行双极性闪电的极性反转机制有了一定的认识,但对于上行双极性闪电,其影响极性反转的放电通道主要发生在云内,难以被光学捕获,早期综合观测资料的缺乏使得学者们仅在放电参数特征上做了有限研究<sup>[16-18]</sup>,未获得此类双极性闪电的放电物理过程以及反转机制的明确认知. Wang 和 Takagi<sup>[19]</sup>基于电场和电流观测提出放电通道极性反转的设想,在雷暴云内负电荷控制地面时,上行正先导 (upward positive leader, UPL) 分支将负电荷输送到通道分叉处,造成已熄灭的正先导分支头部电场方向反转,并进一步产生向正电荷区稳定发展的负先导 (negative leader, NL),从而将正电荷传输到地面引发极性的反转. 近期, Shi 等<sup>[20]</sup>利用闪电甚高频 (very high frequency, VHF) 辐射源定位对 3 例极性单次反转的高塔上行双极性闪电进行了分析,在 Wang 和 Takagi<sup>[19]</sup>设想模型的基础上,定位到起始于已熄灭正先导头部的负先导,进一步指出主通道的截断使得持续发展的正先导在已熄灭正先导分支上积累负电荷,导致通道头部电场反向后产生负先导. 而 Yoshida 等<sup>[6]</sup>分析一次人工引发的双极性闪电的 VHF 干涉仪定位结果,推测闪电极性反转前击穿空气的负先导起始于附近孤立的负电荷区,其作

为桥梁连通了云内正电荷区和闪电接地通道的正先导分支,导致了通道电流极性的反转,然而对该正先导分支未有直接观测结果. 所以上行双极性闪电云内通道的发展及极性反转的形成机制至今并未探究透彻,目前国内对上行双极性闪电极性反转机制的讨论为空白,而已有的国际研究中,对导致极性反转的先导与接地主通道的连接过程未做过多讨论,对在初始电流阶段极性发生多次反转的原因也尚无清晰认识. 因此仍迫切需要对这一罕见的闪电现象提供更多的观测资料 and 个例分析,以开展对上行双极性闪电云内正、负极性先导放电物理过程及其对地转移电荷极性反转的作用机制研究.

本文将综合利用高时间分辨率的闪电 VHF 干涉仪动态成像结果<sup>[21]</sup>、通道底部电流、主观测点快电场变化和高速光学同步资料对一次在初始连续电流阶段对地转移电荷极性发生两次反转的双极性人工引发雷电放电过程进行详细分析,探究其极性反转前后放电过程的通道特征,进一步讨论其电荷传输及极性反转的物理机理.

## 2 实验观测及数据

在合适的雷暴天气条件下,人工引发雷电作为一种最接近自然雷电的模拟源,利用拖带金属丝的火箭可以使雷电在某一预知的时间和地点发生,为雷电放电参数的测量和雷电物理的研究提供条件<sup>[22]</sup>. 本文涉及的人工引发雷电来自 2015 年夏季在山东省滨州市沾化区开展的山东人工引发雷电实验<sup>[23-25]</sup> (Shandong triggering lightning experiment, SHATLE). 实验设有两个观测点,一个为近距离观测点即火箭发射场,观测仪器有通道底部电流测量装置和磁场测量设备等,另一个为主观测点,距离火箭发射场 970 m,布置有闪电 VHF 动态成像干涉仪,高速摄像,快、慢电场变化测量仪等,各资料利用 GPS 提供的准确时钟信息保持时间一致性.

本文使用的数据资料包括通道底部雷电流,主观测点快电场变化、高速光学及 VHF 干涉仪动态成像结果等. 其中通道底部电流测量分别采用阻值为 0.5 m $\Omega$  及 5 m $\Omega$  的两个同轴分流器进行直接测量,二者的电流探测量程分别为  $\pm 40$  kA 和  $\pm 2$  kA,探测带宽为 DC~3.2 MHz,采样率为 50 MS/s,单次记录长度为 2 s,考虑到环境噪声和设备垂直分辨率,最小可测量电流约  $\pm 9.3$  A<sup>[26]</sup>. 主观测点快

电场变化的探测带宽为 1.5 kHz—2 MHz, 时间常数为 0.1 ms, 采样率为 5 MS/s. 高速摄像光学资料时间分辨率为 30.29  $\mu$ s, 像素分辨率为 512  $\times$  384, 用于对视野内的云外闪电通道进行分析. 闪电 VHF 干涉仪的工作频带为 140—300 MHz, 采样率为 1 GS/s, 垂直分辨率为 8 bit, 单次记录长度为 1 s<sup>[27,28]</sup>, 能获得闪电 VHF 放电辐射源二维 (2D) 定位和高时空分辨率的动态成像, 且不受云体遮挡的影响, 其闪电通道定位结果与光学资料对比具有较高一致性, 总体定位误差随仰角增大而减小, 平均定位误差小于 1°. 由于本文人工引发雷电距离闪电 VHF 干涉仪较近, 辐射源主要集中在云内较高仰角位置, 所以闪电 VHF 干涉仪定位结果能客观刻画闪电通道的发生发展. 另外, 本文使用主观测点周围 15 km 范围内布置的 8 站磁天线时间差定位网络, 提供的闪电强脉冲放电三维 (3D) 定位结果, 用于对部分强放电过程的简要描述.

文中采用大气电学定义, 雷暴云中负电荷被中和或负电荷向远离测站的方向发展 (即云内负电荷的减少) 表现为电场变化的正向增大, 负电荷向地面传输对应的电流极性为负. 以闪电上行正先导起始时刻作为相对时间零点.

### 3 分析结果

研究的双极性闪电发生于 2015 年 8 月 14 日 15:52:21(世界时). 图 1 为高速摄像视野内放电全过程光学通道叠加图, 其中: 虚线下部较直部分为火箭钢丝引导的人工引雷放电通道, 钢丝通道顶端距地垂直高度约 171 m; 上部为自然放电通道, 密集的细小通道是负先导的分叉通道进入光学视野内的通道叠加.

图 2 是闪电全过程的多个同步观测数据随时间变化结果. 图 2(a) 为高速光学中针对自然通道 (不包含钢丝通道) 部分计算的相对光强值, 反映了视野可见的放电通道亮度随时间的变化. 每一帧的相对光强  $L_{R,i} (i = 1, 2, 3, \dots, k)$  按如下方法计算:

$$L_{R,i} = \frac{L_i - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}}, \quad (1)$$

其中,  $L_i$  为第  $i$  帧光强值, 是接地主通道的自然通道部分所有像素点在该帧的亮度叠加;  $L_{\min}$  为闪电通道未发光时的背景光强值, 为避免识别误差取上

行正先导始发前几帧的光强值的平均;  $L_{\max}$  为各帧光强值中的最大值. 图 2(b) 为 5 m $\Omega$  同轴分流器测得的通道底部电流波形和幅值归一化后的主观测点快电场变化波形. 根据图 2(a) 和图 2(b) 多个同步资料, 结合此次双极性闪电放电通道的特征, 可以知道此次双极性闪电包含约 315 ms 的初始过程, 无回击发生. 初始过程主要包括负极性初始连续电流阶段 1( $t_0-t_2$ )、正极性初始连续电流阶段 ( $t_2-t_4$ )、负极性初始连续电流阶段 2( $t_4$ —结束). 三个放电阶段持续时间分别为 152.755, 87.225 和 75.02 ms, 转移电荷量分别约为 -40.0, +13.3 和 -1.0 C. 其中在负极性连续电流阶段 2 中, 包含一次初始连续电流脉冲 (initial continuous current pulse, ICCP) 过程.

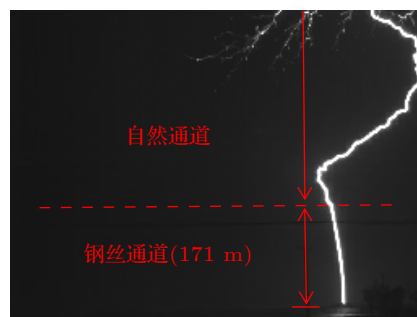


图 1 高速摄像视野内闪电全过程光学通道叠加 (虚线分界线上部为部分自然通道, 下部为火箭钢丝引导的放电通道, 高度约 171 m)

Fig. 1. Composed optical image shows the flash channel structure in the high-speed field (the upper part of the dotted line shows the partial natural channel, and the lower part shows the wire vaporization channel, with a height of about 171 m).

图 2(c) 和图 2(d) 分别为辐射源仰角随时间变化和方位角-仰角二维定位结果, 辐射源颜色随时间由蓝色到红色变化. 由图 2(d) 定位结果可得, 引雷火箭上升至距地面约 171 m 的高度后, 从钢丝顶端始发上行正先导, 到达 S1 处后形成多个分支通道继续发展, 此时段辐射源定位结果密集复杂, 多为通道收敛且发展迅速的负极性反冲流光. 随后  $t_1$  时刻在云内已电离的通道 P 点处 (方位角约 187°, 仰角约 73°) 始发了一支击穿空气的负先导通道, 其开辟新的通道向仰角减小的方向发展, 持续发展约 94.7 ms 后在仰角约 2° 的地方逐渐熄灭. 在后期的云内放电过程中, 闪电通道主要表现为在已熄灭的正极性通道上的多次反冲放电过程.



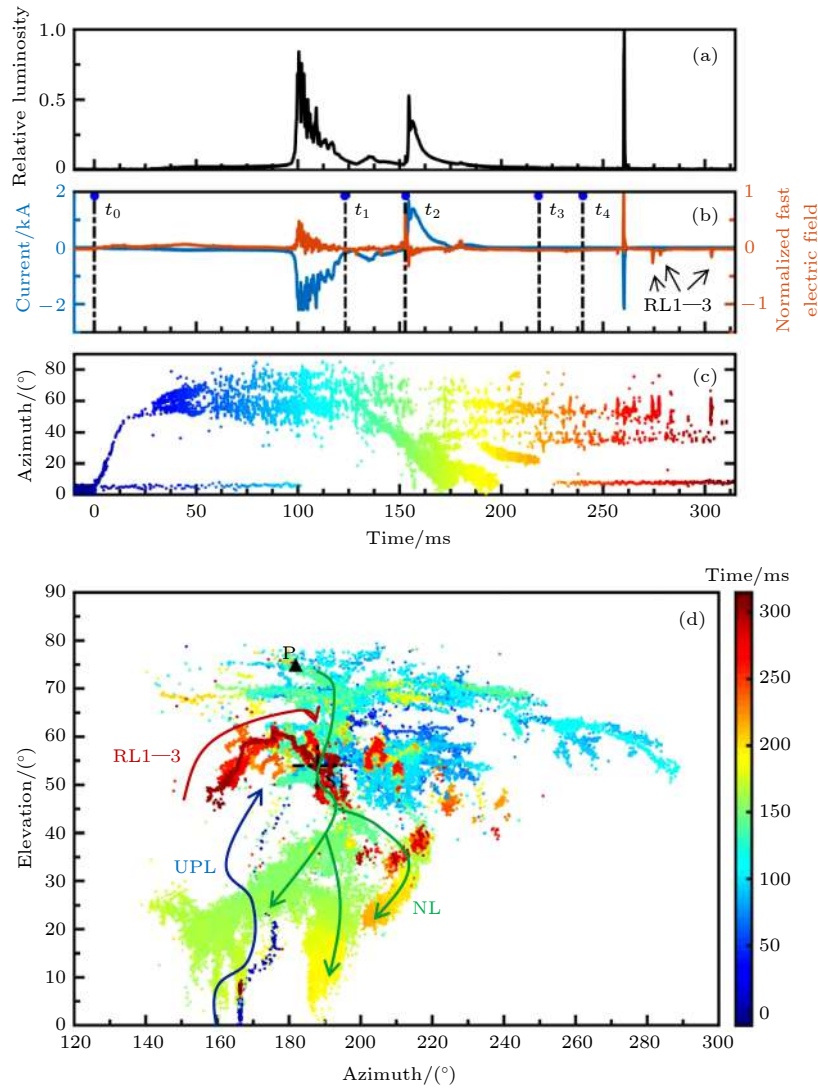


图 2 闪电全过程的多个同步观测数据随时间变化结果 (a) 由高速光学针对自然通道 (不含钢丝通道) 部分计算得到相对光强变化; (b) 通道底部电流和幅值归一化后的主观测点快电场变化, 图中标注  $t_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ) 代表时间如下:  $t_0 = 0$  ms,  $t_1 = 123.9$  ms,  $t_2 = 152.755$  ms,  $t_3 = 218.6$  ms,  $t_4 = 239.98$  ms, RL1-3 为闪电后期的 3 次反冲先导放电过程; (c) VHF 辐射源仰角变化, 辐射源颜色随时间由蓝色到红色变化, 下同; (d) VHF 辐射源方位角-仰角二维定位结果, 蓝色、绿色、红色指示箭头分别指示上行正先导、负极性先导和 3 次反冲先导的发展方向, S1 为上行正先导发展至云内的分叉点, P 为负先导起始处, 下同

Fig. 2. Results of multiple simultaneous observations of the overall lightning discharge process vary with time: (a) Relative luminosity for natural channel (without wire channel) from high-speed optical images; (b) channel-base current and normalized fast electric field change of the main observing station,  $t_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ) is listed as follows:  $t_0 = 0$  ms,  $t_1 = 123.9$  ms,  $t_2 = 152.755$  ms,  $t_3 = 218.6$  ms and  $t_4 = 239.98$  ms, RL1-3 shows three recoil leaders of late stage of the lightning; (c) elevation of VHF sources vary with time, color of radiation sources change from blue to red with time, the same blow; (d) azimuth-elevation of VHF 2D map, the blue, green and red arrows indicate the development direction of UPL, NL and RL1-3 channels, S1 shows the branching point of the UPL after developing to the cloud, P shows the initial point of NL, the same blow.

有趣的是, 在闪电前期 100 ms 及后期约 90 ms 的阶段, 低仰角处 (约  $6^\circ$ ) 定位到分布在钢丝通道较高位置处的辐射源, 放电高度随时间未有明显变化, 辐射源功率强度较小, 可能为钢丝通道在强电场环境下的击穿放电, 并在整个闪电放电过程中持续存在, 因 VHF 干涉仪仅能定位同时发生的多个

击穿放电中的较强放电, 所以该钢丝顶端的击穿被闪电中期较强的云内放电所淹没, 这里不做更多的讨论.

下面具体分析从初始负极性连续电流阶段 1、ICCP 后至闪电结束、第 1 次极性反转、第 2 次极性反转和 ICCP 过程这 5 个放电过程.

### 3.1 负极性初始连续电流阶段 1

火箭发射后,  $t_0$  时刻通道底部电流和快电场变化分别出现明显的负、正极性脉冲序列, 对应光学图像及辐射源定位结果中观测到在钢丝顶端始发并自持发展的上行正先导, 此时负电荷沿接地通道向地面传输. 正先导向发展过程中, 无明显分叉, 根据辐射源定位结果估算上行正先导平均 2D 传输速度约  $3.7 \times 10^4$  m/s, 对应通道底部电流和快电场变化分别缓慢地负向、正向增大. 上行正先导始发约 32.65 ms 后发展到距地面高度约 1.39 km 的 S1 处, 如图 3(a), 通道出现明显分叉, 并沿图中箭头所示的方向继续发展. 其中一路上行分支通道发展到距地面高度约 2.67 km 处后, 探测到一系列以 S1 为中心发展的尺度较小、放电活跃的负极性反冲流光, 辐射源非常密集, 说明此时云内放电通道主要通过反冲流光的形式不断构建细小的正极性分支通道向空间发展, 持续向地面传输负电荷, 主通道与地面处于良好的导通状态, 通道底部电流和快电场变化持续地负向、正向增大. 高速光学视野内接地主通道 (图 3(b)) 与上行正先导 VHF 辐射源定位结果有较高的一致性.

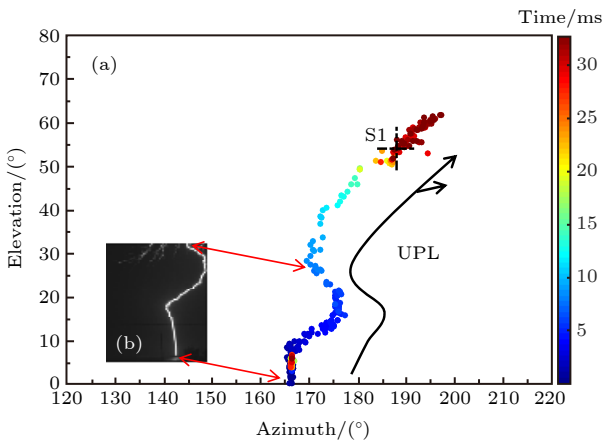


图 3 上行正先导 VHF 辐射源定位结果与高速光学视野对应 (a) 上行正先导的 VHF 辐射源定位; (b) 高速光学全过程通道叠加

Fig. 3. Azimuth-elevation of VHF 2D map of UPL compared with the composited high-speed optical image: (a) Azimuth-elevation of VHF 2D map of UPL; (b) composited optical image shows the flash channel structure in the high-speed field.

$t = 101$  ms 时电流达到负向峰值,  $0.5$  mΩ 的同轴分流器测得峰值电流约  $-3.8$  kA. 此后通道底部电流幅值开始逐渐减小, 云内放电依然以尺度较

小的负极性反冲过程为主, 但活跃和密集程度均有所减缓. 当  $t_1 = 123.9$  ms 时, 一支先导通道在云内已电离的正极性通道的 P 点位置处始发, 向仰角减小的方向发展, 如图 4(b) 和图 4(c), 辐射源密集, 辐射强烈且主要集中于放电通道头部, 可分辨出较多分叉通道同时发展, 没有明显的反冲过程, 平均 2D 传输速度约  $1.59 \times 10^5$  m/s. 在仰角较低处有较多分叉通道进入高速光学观测视野范围内 (见图 1 上部区域), 对应快电场变化波形叠加持续的正极性脉冲序列, 如图 4(a), 表现为明显的负先导击穿空气的梯级发展特征, 由此推断, 这是一支击穿空气的负极性梯级先导. 结合主观测站点周围布设的多站磁天线获得的此次闪电 3D 定位结果发现, 这一时段负先导开辟新通道向远离主通道的水平方向发展.

在负先导发展的过程中, 探测到多次间歇性的快速反冲先导沿着原有正极性电离通道反向发展, 如图 4(c) 中红色箭头所示, 并且可在图 4(a) 中看到当  $t = 128.2$  ms 时通道底部电流的幅值有增大的变化, 推测云内正极性通道仍在发展, 通过接地主通道向地面泄放负电荷.

### 3.2 ICCP 结束后至闪电结束

通常正先导发展时产生的 VHF 辐射较弱, 难以定位出清晰通道<sup>[29]</sup>, 实际探测中常根据正先导通道上的负极性反冲过程来追溯正先导的发展. 因此, 为了获得与主通道相连的正先导通道形态, 以便更加清晰地阐述此次闪电的两次极性反转及 ICCP 放电过程, 以下将提前说明 ICCP 结束后至闪电结束阶段内的 3 次反冲过程.

ICCP 发生后至闪电结束的约 54 ms 内, 此阶段通道底部电流整体低于最小可探测电流, 未观测到明显的电流脉冲和相对光强变化, 但高速光学中闪电的自然通道仍保持微弱亮光, 快电场变化上出现了 3 次明显的负极性脉冲, 对应 VHF 辐射源定位结果中 3 次连续清晰的反冲过程, 见图 2(b) 中标识出的 RL1—3.

如图 5(a), RL1 始发于主通道右侧, 沿着呈类蝴蝶结形状的曲折通道发展至接地主通道 S1 附近后中止, RL2 和 RL3 均始发于主通道左侧, 沿相同通道发展并连接到 RL1 通道上, 沿 RL1 通道继续发展. 可见 3 次反冲先导尽管起始位置不同, 但最终均沿相同的通道发展至 S1 附近. 此时已处于闪

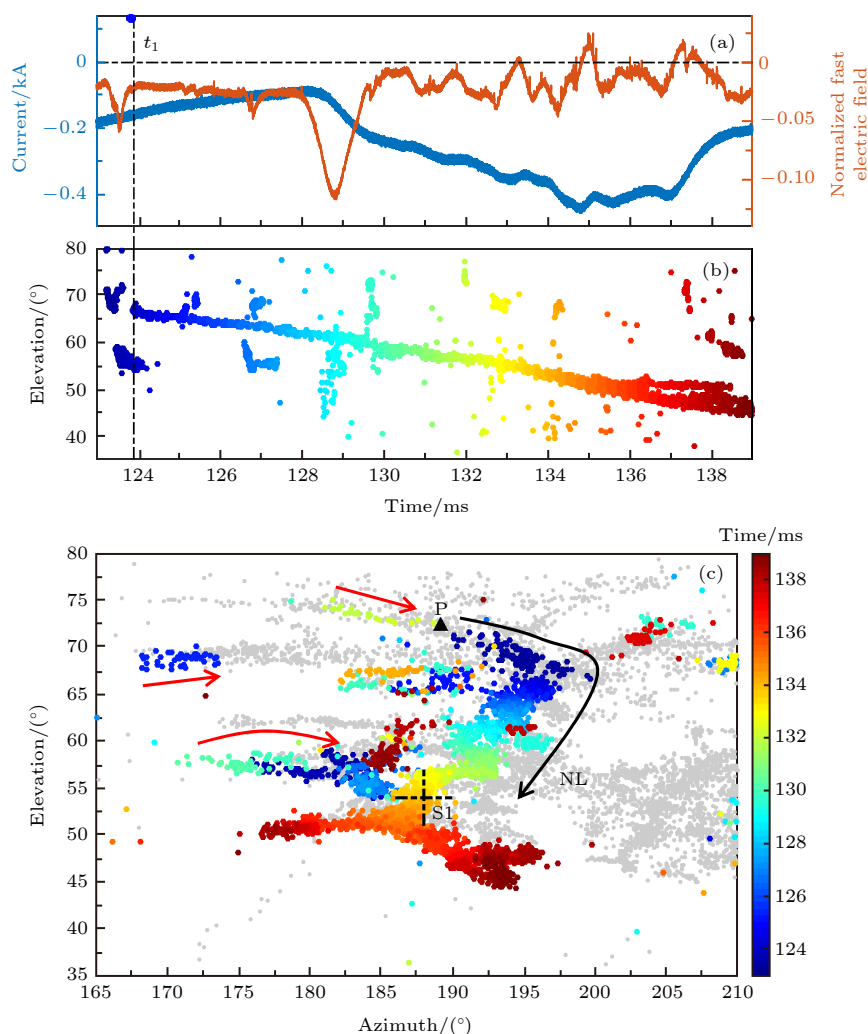


图 4 负先导始发前后的同步观测数据随时间变化 (a) 通道底部电流和快电场变化波形; (b) VHF 辐射源仰角变化; (c) 方位角-仰角二维定位结果, 灰色散点为  $t_1$  时刻前的闪电通道定位结果, 红色箭头为负先导发展过程中多次间歇性的反冲过程

Fig. 4. Results of multiple simultaneous observations before and after the initiation of the NL vary with time: (a) Channel-base current and fast electric field changes; (b) elevation of VHF sources varies with time; (c) azimuth-elevation of VHF 2D map. Gray scatter points are locations of radiation sources before  $t_1$ , and the red arrows are a series of recoil leaders during the development of the NL.

电放电末期, 通道底部电流和相对光强值较小且没有明显的脉冲变化, 难以判断 3 次反冲先导过程对电流的影响以及接地通道较高位置处是否已经发生截断, 但由于 3 次反冲先导均沿着先前已电离的正极性通道反向发展, 通道延伸至 S1 处附近, 因此判断 3 次反冲先导所在的正极性通道在 S1 处连接到接地主通道上, 结合上行正先导起始阶段的发展通道, 可以推演得到 S1 附近处的闪电通道分叉情况如图 5(b) 所示。

### 3.3 第 1 次极性反转

负先导向仰角减小的方向发展过程中, 快电场变化上叠加了越来越密集且清晰的正极性脉冲, 通道底部电流的幅值缓慢减小, 负先导始发约

28.815 ms 后, 如图 6(a), 在  $t = 152.716$  ms 时快电场波形上出现了一个明显的负极性脉冲, 脉冲宽度约 1.5  $\mu$ s, 随后通道底部电流的幅值明显减小、快电场变化和相对光强幅值快速增大. 约 39  $\mu$ s 后, 即  $t_2 = 152.755$  ms 时通道底部电流的极性由负变为正, 表明接地主通道对地转移电荷极性由负变为正, 完成了第 1 次的极性反转。

在通道底部电流极性反转前约 1 ms 时间内, 定位到的放电过程主要为向低仰角方向发展的负先导, 以及原有正极性通道中零星的反冲过程. 第 1 次极性反转完成时负先导已到达仰角较低位置处 (约 35°) 并持续发展, 如图 6(b) 和图 6(c). 电场负极性脉冲出现前约 4.5  $\mu$ s 内, 在 S1 附近定位到多个向仰角增大方向发展的辐射源通道 (见图 6(a))

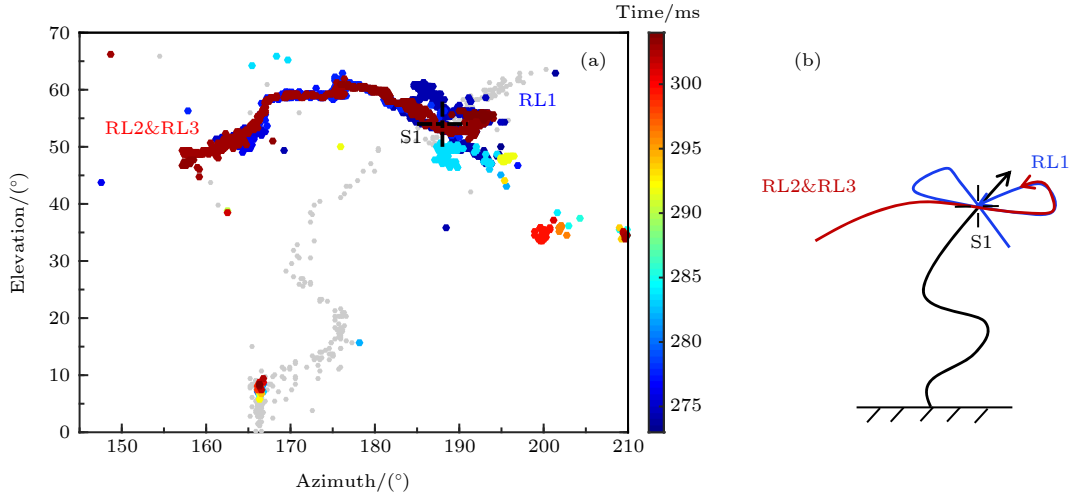


图 5 ICCP 结束后至闪电结束前 3 次反冲过程的 VHF 辐射源定位结果 (a) 3 次反冲过程定位结果, 灰色散点为图 3 中上行正先导的定位结果; (b) S1 附近闪电的正极性分支通道及接地通道示意图, 第 1 次反冲 (RL1) 用蓝色通道代表, 第 2 和 3 次反冲 (RL2&RL3) 均用红色通道代表

Fig. 5. Azimuth-elevation of VHF 2D map of three RLs occurs between the end of ICCP and the end of the lightning: (a) Azimuth-elevation of VHF 2D map of three RLs. Gray scatter points represent radiation sources location of UPL in Fig. 3; (b) schematic diagram of lightning positive branching channels and trunk channel near S1, the blue channel shows the first RL (RL1), the red channel shows the second and third RLs (RL2&RL3).

和图 6(b) 中黑色虚线框内所示), 直到负极性电场脉冲的发生, 表明这些辐射源通道连接到了具有较好导电性的闪电通道上, 产生了类似云内的回击电场脉冲. 根据负极性电场脉冲变化对应负电荷的增多或正电荷的减少, 且辐射源功率较强, 判断这些辐射源是起始于 S1 附近处的负极性击穿放电, 向仰角增大的方向发展连接到负先导末端的正电荷聚集处, 连接过程如图 6(c) 虚线箭头所示, 引起正电荷的短暂减少而产生负极性电场脉冲, 随后将负先导向通道后部输送的正电荷沿主通道传输到地面, 从而引发了通道底部电流极性由负到正的反转. 由于击穿连接位置发生在云内通道上, 因此产生的电场脉冲变化提前于通道底部电流极性反转. 图 6(c) 中的子图给出的是负极性击穿放电在时间  $t = 152.71\text{--}152.72\text{ ms}$  的定位, 可以根据颜色变化更清晰地看出负极性击穿放电的起始位置与发展方向.

负极性电场脉冲出现后快电场变化幅值有了更快的增大, 在  $t = 152.769\text{ ms}$  时达到正向峰值. 此阶段定位到多个沿图 5 中 RL1—3 通道末端连接到 S1 附近处, 向空间发展的零星辐射源, 如图 6(c) 中红色箭头所示, 辐射源功率强度较弱, 且无明显的电场脉冲, 认为是负先导末端接入接地主通道后, 大量正电荷不仅通过接地主通道向地面传输, 也通过分叉涌入其他正极性先导通道, 正电荷

的突然增多对应于地面电场的快速正向变化, 另外将使得分叉通道与环境电场增大从而产生侧向的击穿放电而被定位到. 由于正先导分支通道原有电流与新汇入的正电荷对应电流方向相同, 将产生电流的增强, 可能使正先导通道温度增高、导电性增强而更为稳定发展, 表现为负反冲过程的明显减少. 若正先导头部在负电荷区的环境电场不足以维持正先导的发展, 正先导通道将逐渐熄灭. 随着负先导的进一步发展, 其头部前方正电荷区的电荷快速对地转移, 地面电场快速负向变化, 通道底部电流继续正向增大, 在第 1 次极性反转约 1.75 ms 后, 在  $t = 154.5\text{ ms}$  时通道底部电流达到峰值, 约 +1.6 kA, 约为负极性最大峰值电流绝对值的 57.9%, 随后通道底部电流逐渐减小.

### 3.4 第 2 次极性反转

从定位结果可知, 在正极性初始连续电流阶段, 负先导通道不断延伸, 在第 1 次极性反转约 65.85 ms 后, 于  $t_3 = 218.6\text{ ms}$  时在仰角约  $2^\circ$  的地方逐渐熄灭. 负先导从起始到熄灭共持续发展了约 94.7 ms. 在负先导逐渐熄灭的过程中通道底部电流和快电场变化的幅值均逐渐减小. 由图 7(b) 看出, 该阶段正极性电流自较小幅值处缓慢衰减, 波形平坦未有明显的电流脉冲变化, 在负先导熄灭约 21.38 ms 后, 在  $t_4 = 239.98\text{ ms}$  时通道底部电



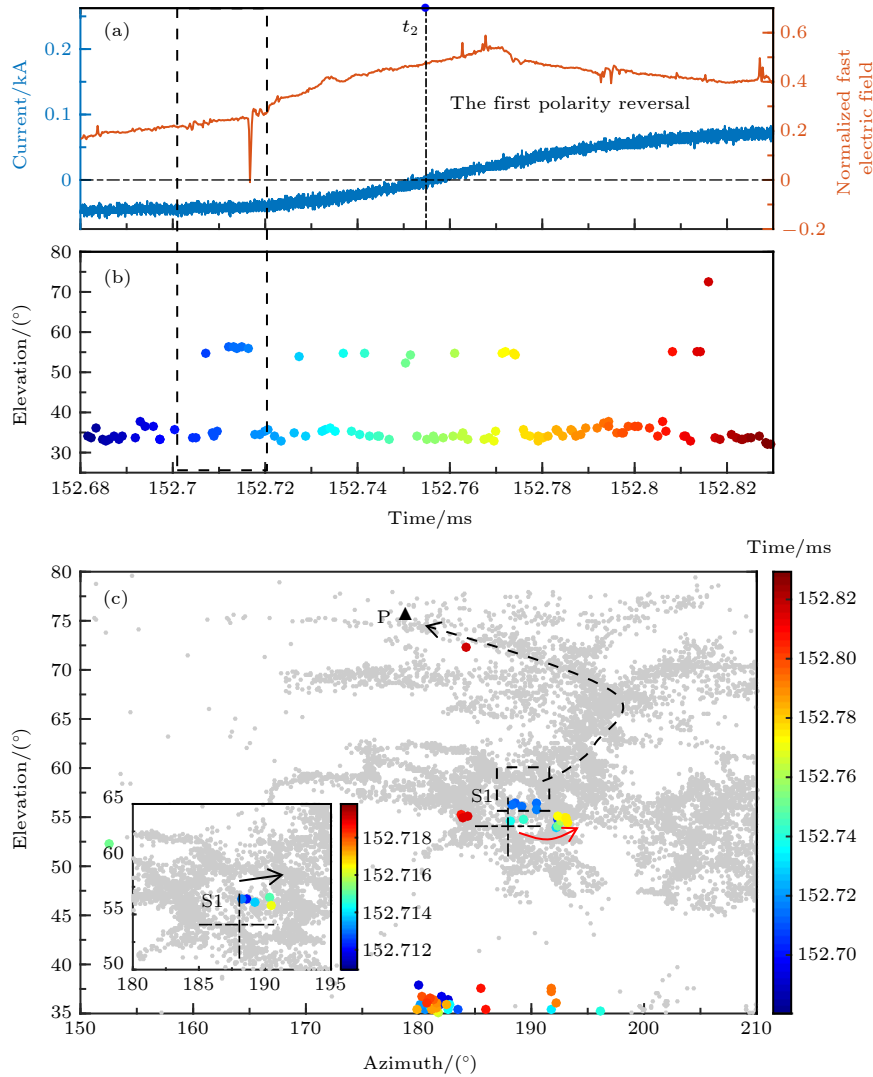


图 6 第 1 次极性反转前后的同步观测数据随时间变化结果 (a) 通道底部电流和快电场变化波形; (b) VHF 辐射源仰角随时间变化; (c) 方位角-仰角二维定位结果, 灰色散点为负先导起始前的正极性通道与图 5 中 3 次反冲过程的定位结果, 虚线框内为负极性脉冲前辐射源沿黑色实线箭头方向发展, 红色箭头为负极性脉冲后辐射源发展方向, 黑色虚线箭头为推断通道, 子图为虚线框内的辐射源在  $t = 152.71-152.72$  ms 范围内的放大图

Fig. 6. Results of multiple simultaneous observations before and after the first polarity reversal vary with time: (a) Channel-base current and fast electric field changes; (b) elevation of VHF sources vary with time; (c) azimuth-elevation of VHF 2D map, gray scatter points are radiation sources location before the initiation of NL and RL1-3 in Fig. 5, the black solid line and dashed line represent the actual detected channel and the inferred channel, the same blow, the radiation sources in the dotted box represent negative breakdown discharge, the red arrow is the breakdown discharge after the negative polarity pulse. The subgraph is an enlarged view of the radiation source in the dotted box at  $t = 152.71-152.72$  ms.

流极性变为负极性, 发生了对地转移电荷极性的第 2 次反转.

在负先导熄灭前,  $t = 205$  ms 时至  $t_4$  阶段内通道底部电流幅值低于最小探测电流. 结合相对光强值整体逐渐减小但不为零 (如图 7(a)), 高速光学视野内主通道未发生截断, 认为这一阶段云内通道发展减弱或趋于停止, 通道底部仍有较小电流存在. 快电场变化整体为负值, 波形起伏不大,  $t_3$  之后波形上出现两次幅值较小的负极性脉冲, 对应

图 5 中 RL2&RL3 始发位置处两次尺度较小的反冲放电过程, 说明此时正极性通道头部的负电荷区域放电趋于活跃, 通道被重新激活, 此外云内已电离的正极性通道上也有一些零星放电.

基于以上观测结果分析, 认为第 2 次极性的反转是由于负先导于  $t_3$  时逐渐熄灭后, 向地面传输的正电荷逐渐减少, 而云内正先导分支通道重新活跃并持续向主通道传输负电荷, 因此通道底部电流整体幅值变化不大, 极性为平稳转变. 在  $t_4$  时刻接

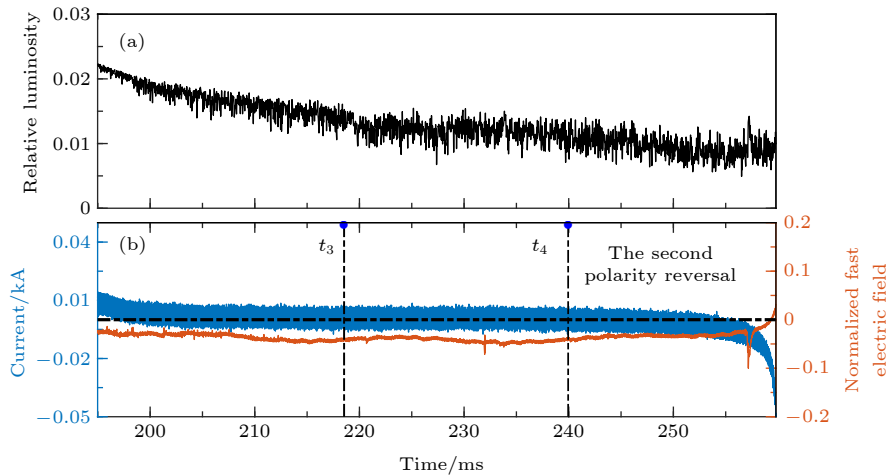


图 7 第 2 次极性反转前后的同步观测数据随时间变化结果 (a) 相对光强变化; (b) 通道底部电流和快电场变化波形, 0 kA 用黑色虚线标识

Fig. 7. Results of multiple simultaneous observations before and after the second polarity reversal vary with time: (a) Relative luminosity of natural channel (without wire channel) from high-speed optical images; (b) channel-base current and fast electric changes, the black dotted line marks 0 kA.

地主通道内净电荷由正电荷逐渐变为负电荷时, 完成了本次双极性闪电的第 2 次极性反转.

### 3.5 ICCP 过程

在 3.4 节中  $t = 257 \text{ ms}$  时, 快电场变化上出现 1 次负极性脉冲 (见图 7(b)), 对应在已电离的 RL2&RL3 的通道末端探测到尺度较小的 1 次反冲放电, 约 0.3 ms 后初始连续电流波形上发生 ICCP 过程, 持续时间约 1.2 ms, 向地面传输电荷约  $-1.0 \text{ C}$ .

图 8 为发生 ICCP 前后的同步观测数据随时间变化结果. 从图 8(a) 通道底部电流波形可看出, 此阶段内前期的初始连续电流波形较为平稳, 从  $t = 260 \text{ ms}$  开始, 初始连续电流快速负向增大, 并于  $t = 260.19 \text{ ms}$  和  $t = 260.38 \text{ ms}$  达到两次极大值, 电流极值分别为  $-2 \text{ kA}$  和  $-2.25 \text{ kA}$ , 随后电流幅值缓慢下降至原有最小探测水平, 整个阶段电流脉冲从 10% 到 90% 峰值的上升时间约  $160 \mu\text{s}$ , 脉冲半峰值宽度约  $280 \mu\text{s}$ , 均明显大于 Qie 等 [25] 给出的人工引雷回击脉冲的对应参量的几何平均值 (分别为  $1.0 \mu\text{s}$  和  $14.8 \mu\text{s}$ ), 与 ICCP 波形特征 (分别为  $437 \mu\text{s}$  和  $712 \mu\text{s}$ ) 相符合. 对应的快电场开始变化比电流开始变化提前约  $30 \mu\text{s}$ , 在两次极值前表现为先正向增大后负向减小的变化趋势.

由图 8(b) 和图 8(c) 定位结果可以看到 ICCP 发生前的辐射源同样起始于 RL2&RL3 的末端, 由于此位置之前已有多次放电使得通道被重新激活,

因此认为影响产生 ICCP 的反冲先导沿着与图 5 中 RL2&RL3 相同的通道发展至 S1 附近, 并连接到主通道上, 连接过程如图 8(c) 中的推测通道 (虚线) 所示. 负电荷沿通道首先向远离测站的方向发展, 后向靠近测站的方向发展并最终自上而下地传输到地面, 引起了通道底部电流和快电场变化波形上的跃变.

## 4 讨论

根据以上对此次双极性人工引发雷电极性反转前后通道底部电流、主观测点快电场变化及先导通道的发展分析发现, 第 1 次极性反转前, 快电场变化波形上的负极性脉冲, 对应于上行正先导云内分叉点 S1 处附近的负极性击穿放电, 其作为桥梁将负先导末端正电荷沉积区域与接地主通道相连, 继而使得持续发展的负先导能够向地面转移大量正电荷, 紧随发生对地转移电荷极性的第 1 次反转. 负先导逐渐熄灭后, 云内未熄灭的正极性放电通道继续向接地主通道输送负电荷, 引发了对地转移电荷极性的第 2 次反转. 由于第 2 次电流极性转变缓慢, 且接地主通道持续发光未截断, 所以认为在正极性初始连续电流期间, 正极性通道和负先导通道均连接到主通道上, 分别对地转移不同极性的电荷. 综上, 击穿空气的负先导通道与接地主通道的连接过程以及持续发展的正极性先导在此次人工引发雷电对地转移电荷极性两次反转的过程中

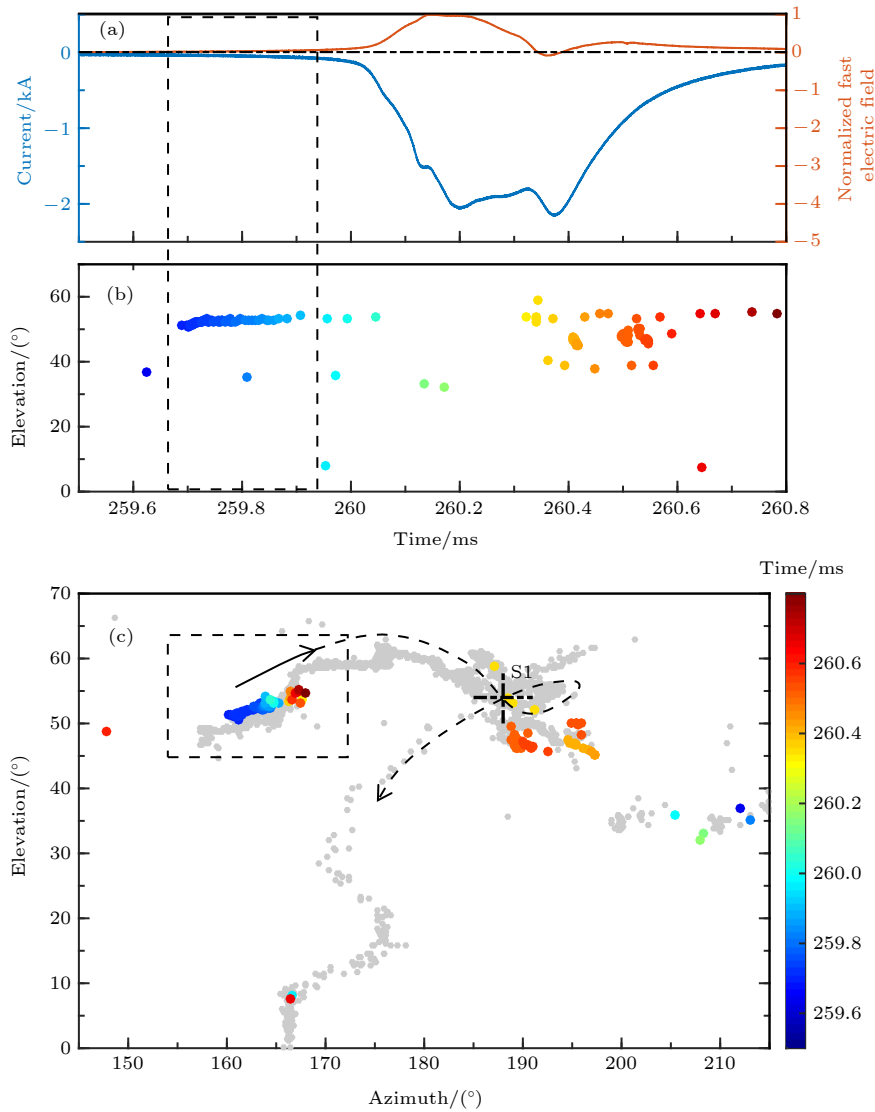


图 8 ICCP 前后的同步观测数据随时间变化结果 (a) 通道底部电流和快电场变化波形; (b) VHF 辐射源仰角变化; (c) 方位角-仰角二维定位结果, 灰色散点为图 5 的闪电通道定位结果, 虚线框内为影响产生 ICCP 的反冲先导过程  
 Fig. 8. Results of multiple simultaneous observations before and after the ICCP vary with time: (a) Channel-base current and fast electric field changes; (b) elevation of VHF sources varies with time; (c) azimuth-elevation of 2D map, gray scatter points is radiation sources location in Fig. 5, the radiation source points in the dotted box show the recoil leader that produces ICCP.

扮演了重要角色.

很多学者报道在原有正极性通道上产生负先导的现象, Saraiva 等<sup>[14]</sup>利用光学资料发现负反冲先导先是沿着已电离正极性通道的路径发展, 后产生击穿空气的负极性先导, 但未说明负极性击穿的起始位置. 在此次放电过程中也观测到由负反冲先导引发的击穿空气的负极性先导, 负反冲先导起始于已电离正极性通道上, 沿该路径反向发展一段距离后脱离原有路径, 转而击穿空气形成新的放电通道, 这与原有通道冷却、导电性降低或空间负电荷区影响等因素有关, 但与持续时间约 94.7 ms 的负先导不同, 这些击穿空气的负极性先导持续时间仅

约几个毫秒或更短, 并未影响对地转移电荷极性的反转.

Shi 等<sup>[20]</sup>定位到负先导始发于已熄灭正先导分支头部. Pu 和 Cummer<sup>[30]</sup>利用高精度的 VHF 干涉仪定位资料发现已截断的正先导通道产生侧向针状的负极性击穿放电. 本例中, 击穿空气的负先导起始于已电离的正极性通道上, 未识别出其是否起始于熄灭的正先导分叉通道头部, 考虑到本次个例负极性反冲放电密集短促, 且 2D 定位结果中存在一定的通道重叠, 可能存在难以分辨的极为细小正先导分支. 利用多站磁天线网络定位到负先导远离接地主通道水平发展, 简单推测对应的参与放

电的正、负电荷区域呈水平分布. 基于以上观测事实, 本文将通过图 9 的示意图, 具体讨论双极性闪电云内正、负极性通道发展特征及极性反转的机制.

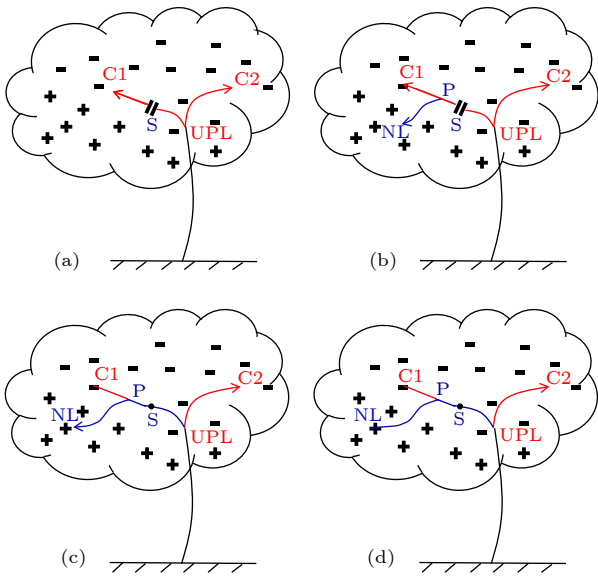


图 9 本次对地转移电荷极性两次反转的机制示意图 (a) 上行正先导的分叉与截断; (b) 负先导的产生; (c) 对地转移电荷极性第 1 次反转; (d) 对地转移电荷极性第 2 次反转 (红、蓝色通道分别代表正、负先导通道, 黑色代表接地主通道; 实线表示通道正在发展, 虚线代表通道处于熄灭状态)

Fig. 9. Schematic diagram showing the mechanism of the two polarity reversals of charges transferred to the ground: (a) Branching and cutoff of upward positive leader; (b) generation of negative leader; (c) the first reversal of the polarity of charge transferred to the ground; (d) the second reversal of the polarity of charge transferred to the ground (red and blue channels represent positive and negative leader channels, respectively, the black channel represents the trunk channel, solid lines indicate that the channel is developing, and dashed lines indicate that the channel is extinguished).

1) 由人工引雷引发的上行正先导在雷暴云负电荷区呈多个分支同时发展并向地面传输负电荷, 如图 9(a) 中 C1 和 C2. 通道发展过程中, 由于两个正先导头部前方的电势差异, 导致分叉通道发展不平衡, 或由于 C1 通道自身电导率或先导核温度下降等一系列稳定条件不满足, 进而发生失稳导致 C1 通道发生断裂<sup>[31,32]</sup>(如图 S 处), 并自断裂处逐渐向 C1 通道头部熄灭成悬浮通道.

2) 悬浮通道 C1 正极性头部向前继续发展的过程中, 其向后传输的负电荷可在点 P 位置处堆积, 如图 9(b), P 点可以为 C1 通道上熄灭的细小的正先导分支通道头部, 也可以为 C1 通道自身的

某处. 若堆积的负电荷积累到一定程度后或受到周围放电影响, 使得通道 P 点与环境之间的电势差增大达到击穿阈值, 将在 P 点激发击穿空气的负先导向云内正电荷区发展. 活跃发展的正极性通道 C2 持续向地面转移负电荷, 此时通道底部电流依旧为负.

3) 负先导的持续稳定发展, 将云内正电荷区的电荷向通道后方 P 点处传输, 可能在原有通道截断位置 S 处沉积, 也有可能 P 点产生新的正先导沿原有熄灭通道向 S 方向发展, 与负先导形成双向先导通道. 因负先导的持续发展引起悬浮通道电势整体抬升, S 点处的电场方向转而指向主通道, 当电场阈值达到负极性击穿条件时, S 点发生自接地主通道向悬浮通道末端正电荷聚集区或者双向先导正极性端的负极性击穿放电, 使得截断通道重新激活导通. 此时, 正极性通道 C2 和负极性通道 (NL) 均连接到主通道上, 分别对地传输负电荷和正电荷. 由于持续强烈发展的负先导短时间内对地传输大量的正电荷, 所以主通道内的净电荷快速转变为正电荷, 对地转移电荷极性发生了第 1 次反转, 正极性通道 C2 也可能因同向电流的汇入而更易保持稳定发展, 如图 9(c) 所示.

4) 当负先导头部电场强度不足以维持其继续发展或通道本身的电导率逐渐减小时, 负先导逐渐停止发展, 同时向地面传输的正电荷逐渐减少. 而云内未熄灭的正极性通道持续对地传输负电荷, 当主通道内净电荷逐渐变为负电荷后, 对地转移电荷极性缓慢地发生了第 2 次反转, 如图 9(d) 所示.

Shi 等<sup>[20]</sup>报道的上行双极性闪电发生于日本冬季雷暴中, 电荷结构为正、负电荷区垂直分布的偶极子或者反偶极子, 击穿空气的负先导始发约 4 ms 后便非常迅速地引起了通道底部电流极性的反转, 但并未报道在极性反转前是否存在电场上的脉冲变化, 也并未对负先导产生后原有接地主通道重新导通的放电过程和机制进行解释. 在本文个例中, 定位到负先导远离接地主通道水平发展, 对应的参与放电的正、负电荷区域呈水平分布. 此外, 负先导持续发展了约 28.816 ms 后, 才因接地主通道附近向负先导末端正电荷聚集区域或双向先导正极性端的负极性击穿放电, 引发负极性电场脉冲及随后对地转移电荷极性的快速反转, 这一放电事件在国际上为首次报道. 负先导始发与极性反转的长时间间隔, 一方面与截断位置 S 处通道冷却电导



率下降有关,另一方面可能与悬浮通道电势抬升较慢有关.

目前,上行双极性闪电在初始连续电流阶段极性多次反转的原因尚不明确,Wantanabe等<sup>[11]</sup>猜想由于在云内某高度相邻区域存在不同极性的口袋电荷区,上行正先导入云后产生许多水平发展的分支,相继进入到不同极性的口袋电荷区,从而导致电流极性的多次反转,但未有明确的观测证据.从本文来看,是水平分离的正、负两个电荷区参与放电,负先导进入正电荷区并与接地主通道相连引起了第1次极性反转,负先导熄灭后,云内未熄灭的正极性通道持续对地传输负电荷,引起了第2次的极性反转.

另一个值得关注的问题是,本次个例通道极性第1次反转前仅探测到自接地主通道始发的负极性放电,而一般相较于负极性击穿,正极性击穿的电场阈值更低更容易发生,因此很有可能这一作为桥梁连接接地主通道和悬浮通道的击穿放电起始于接地主通道和悬浮通道之间,以正、负击穿双向先导发展的形式分别向接地主通道和悬浮通道发展,只是其正极性击穿一端未被干涉仪探测到,而这一击穿放电的产生条件、起始位置及极性的影响机制仍然需要更多的研究.

## 5 总 结

本研究基于闪电 VHF 干涉仪动态成像定位结果,结合通道底部电流、快电场变化、高速光学等多种同步观测资料,对一次在初始电流阶段对地转移电荷极性发生两次反转的双极性人工引发雷电进行了详细研究.主要探讨了极性反转前后通道底部电流、快电场变化、相对光强的放电特征以及对应放电通道的时空演变,着重对影响极性反转的放电通道特征、上行双极性闪电形成机制做了分析与讨论,得到以下结论:

1) 此次双极性过程包含约 315 ms 的初始电流阶段,无回击过程.在初始电流阶段极性发生了两次变化,对地传输电荷极性先负后正再负,分别向地面传输电荷约 $-40.0$  C,  $+13.3$  C 和 $-1.0$  C,峰值电流约 $-8$  kA,  $+1.6$  kA 和 $-2.25$  kA.上行正先导的 2D 传输速度约  $3.7 \times 10^4$  m/s.负先导击穿空气开辟新通道向水平方向发展,2D 传输速度约  $1.59 \times 10^5$  m/s.

2) 击穿空气的负先导与接地主通道相连和正

先导的持续发展是此次双极性闪电对地转移电荷极性发生两次反转的重要原因.负先导击穿空气开辟新通道发展,随后原正极性分支通道截断位置处发生的负极性击穿与负先导通道末端的正电荷聚集处连接,也有可能负先导起始后呈双向先导发展,那么负极性击穿将与双向先导的正极性端相连接,将正电荷通过接地主通道向地面传输,通道底部净电荷为正时,对地转移电荷极性由负变为正.当负先导逐渐停止发展,向地面传输的正电荷逐渐减少,而云内未熄灭的正极性分支通道持续发展,对地传输负电荷,当通道底部净电荷为负时,通道底部电流极性由正变为负.

3) 已电离的正极性分支通道上产生的反冲先导过程,连接到主通道上并向地面传输大量负电荷,引发了初始连续电流脉冲.

4) 探测到从已电离正极性通道上始发的击穿空气的负极性先导,可能起始于该正先导通道的侧向击穿放电,也可能起始于其上某细小的正先导分支通道头部电场极性反转后的负先导放电.

本文详细研究了这例罕见的双极性闪电的放电特征以及极性反转前后通道的传输特征,根据观测事实合理地探讨了对地转移电荷极性两次反转的机制并提出了模型图,首次观测到导致对地转移电荷极性由负到正快速反转的负极性击穿放电以及通道截断处重新导通的放电过程和机制,并明确了负先导的熄灭和正先导的持续发展引发了极性由正到负的缓慢转变等.但由于云内放电过程较为复杂,尤其是上行正先导发展入云后短时间内产生多个正极性通道同时发展,云内放电通道十分密集,且负先导通道与部分正极性通道在二维成像上有所重叠,给分析带来了一定的困难.而磁场多站定位结果仅能提供部分强放电的三维位置,时间分辨率较低.因此,未来将进一步利用闪电通道的三维定位结果,更精准地分析闪电通道放电特征,同时结合气象雷达或探空数据综合分析雷暴云动力活动,更加合理地探讨云内电荷分布对放电行为的影响.

感谢中国科学院大气物理研究所袁善锋和张鸿波特别研究助理对本文关于双极性闪电极性反转的物理机制以及论文撰写的有益讨论与建议,感谢所有参加野外实验的伙伴们.

## 参考文献

- [1] McEachron K B 1939 *J. Franklin Inst.* **227** 149
- [2] Hubert P, Mouget G 1981 *J. Geophys. Res. Oceans* **86** 5253
- [3] Akiyama H, Ichino K, Horii K 1985 *J. Geophys. Res. Atmos.* **90** 10674
- [4] Idone V P, Orville R E, Mach D M, Rust W D 1987 *Geophys. Res. Lett.* **14** 1150
- [5] Liu X S, Zhang Y J 1998 *IEE J. Trans. Power Energy* **118** 170
- [6] 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, Akita M 2012 *J. Geophys. Res. Atmos.* **117**
- [7] Hill J D, Pilkey J, Uman M A, Jordan D M, Rison W, Krehbiel P R, I Biggerstaff M, Hyland P, Blakeslee R 2013 *J. Geophys. Res. Atmos.* **118** 8460
- [8] Azadifar M, Li O, Rubinstein M, Rachidi F, Rakov V, Pavanello D 2019 *11th Asia-Pacific International Conference on Lightning* HongKong, China, Jun 12–14, 2019 p1
- [9] Fleenor S A, Biagi C J, Cummins K L, Krider E P, Shao X M 2009 *Atmos. Res.* **91** 333
- [10] Rakov V 2003 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **84** 767
- [11] Watanabe N, Nag A, Diendorfer G, Pichler H, Schulz W, Rakov V A, Rassoul H K 2019 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **61** 705
- [12] Chen L W, Lu W T, Zhang Y J, Wang D H 2015 *J. Geophys. Res. Atmos.* **120** 708
- [13] Saba M M F, Schumann C, Warner T A, Helsdon J H, Schulz W, Orville R E 2013 *J. Geophys. Res. Atmos.* **118** 11098
- [14] Saraiva A, Campos L, Williams E, Zepka G, Alves J, Pinto Jr O, Heckman S, Buzato T, Bailey J, Morales C 2014 *J. Geophys. Res. Atmos.* **119** 6105
- [15] Tian Y, Qie X S, Lu G P, Jiang R B, Wang Z C, Zhang H B, Liu M Y, Sun Z L, Feng G L 2016 *Atmos. Res.* **176** 222
- [16] Jerauld J, Uman M A, Rakov V A, Rambo K J, Jordan D M 2004 *Geophys. Res. Lett.* **31** L08104
- [17] Zhou H L, Diendorfer G, Thottappillil R, Pichler H, Mair M 2011 *J. Geophys. Res.* **116** D13106
- [18] Michishita K, Yokoyama S, Honjo N 2019 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **61** 807
- [19] Wang D H, Takagi N 2008 *Proc. URSI E.* **6** 2
- [20] Shi D D, Wang D H, Wu T, Thomas R J, Edens H E, Rison W, Takagi N, Krehbiel P R 2018 *J. Geophys. Res. Atmos.* **123** 9430
- [21] Cao D J, Qie X S, Duan S, Xuan Y J, Wang D F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069202 (in Chinese) [曹冬杰, 鄒秀书, 段树, 宣越建, 王东方 2012 物理学报 **61** 069202]
- [22] Qie X S, Zhang Q L, Yuan T, Zhang T L 2013 *Lightning Physics* (Beijing: Science Press) p122 (in Chinese) [鄒秀书, 张其林, 袁铁, 张廷龙 2013 雷电物理学 (北京: 科学出版社) 第122页]
- [23] Jiang R B, Qie X S, Wang C X, Yang J, Zhang Q L, Liu M Y, Wang J F, Liu D X, Pan L X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079201 (in Chinese) [蒋如斌, 鄒秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 刘明远, 王俊芳, 刘冬霞, 潘伦湘 2011 物理学报 **60** 079201]
- [24] Wang C X, Qie X S, Jiang R B, Yang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039203 (in Chinese) [王彩霞, 鄒秀书, 蒋如斌, 杨静 2012 物理学报 **61** 039203]
- [25] Qie X, Jiang R, Yang J 2014 *Atmos. Res.* **135** 322
- [26] Qie X S, Pu Y J, Jiang R B, Sun Z L, Liu M Y, Zhang H B, Li X, Lu G P, Tian Y 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 586
- [27] Sun Z L, Qie X S, Liu M Y, Cao D J, Wang D F 2013 *Atmos. Res.* **129** 58
- [28] Sun Z L, Qie X S, Jiang R B, Liu M Y, Wu X, Wang Z C, Lu G P, Zhang H B 2014 *J. Geophys. Res. Atmos.* **119** 13388
- [29] Shao X M, Rhodes C T, Holden D 1999 *J. Geophys. Res. Atmos.* **104** 9601
- [30] Pu Y J, Cummer S A 2019 *Geophys. Res. Lett.* **46** 13556
- [31] Gou X Q, Zhang Y J, Li Y J, Chen M L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 205201 (in Chinese) [苟学强, 张义军, 李亚珺, 陈明理 2018 物理学报 **67** 205201]
- [32] Mazur V 2016 *J. Electrostat.* **82** 79

## Characteristics and mechanism of a triggered lightning with two polarity reversals of charges transferred to ground\*

Tang Guo-Ying<sup>1)2)</sup> Sun Zhu-Ling<sup>2)†</sup> Jiang Ru-Bin<sup>2)</sup> Li Feng-Quan<sup>2)3)</sup>

Liu Ming-Yuan<sup>2)3)</sup> Liu Kun<sup>1)</sup> Qie Xiu-Shu<sup>2)3)</sup>

1) (College of Electronic Engineering (College of Meteorological Observation), Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

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

3) (College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 13 March 2020; revised manuscript received 27 May 2020 )

### Abstract

Characteristics of a triggered bipolar lightning flash obtained in the Shandong triggering lightning experiment (SHATLE) are analyzed based on simultaneous observation results of lightning very high frequency

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41875008, 41775012, 41630425).

† Corresponding author. E-mail: sunzhuling@mail.iap.ac.cn

(VHF) interferometer map, channel-base current, fast electric field change and high-speed optical images. The flash lasts about 315 ms with only the initial continuous current (ICC). As the polarity of charges transferred to the ground varies from negative to positive and then to negative, the ICC can be mainly divided into three stages including the first negative ICC stage, positive ICC stage, and second negative ICC stage, respectively, for 152.755 ms, 87.225 ms and 75.02 ms. Charges transferred to the ground during the three stages are about  $-40.0$  C,  $+13.3$  C and  $-1.0$  C, respectively, with the peak current of about  $-3.8$  kA,  $1.6$  kA and  $-2.25$  kA. According to the VHF interferometer map, during the first negative ICC stage, the upward positive leader (UPL) initiated from the top of the wire as negative charges starts to be transferred to the ground. The UPL develops at a two-dimensional (2D) speed of  $3.7 \times 10^4$  m/s into the cloud and multiple positive branches develop in the form of small-scale and dense recoil leaders, keeping the increase of negative charge transferred to the ground. Then a negative leader (NL) initiates on a previously ionized positive branch channel and develops into the virgin air horizontally as a floating channel at a 2D propagation speed of  $1.59 \times 10^5$  m/s. About 28.816 ms later after the NL develops, a negative pulse is detected in the fast electric field change, caused by a negative polarity breakdown discharge from the grounding trunk channel to the floating channel which is observed for the first time. Then about 39  $\mu$ s later, the first polarity of the channel-base current changes from negative to positive, and rapidly reaches a positive peak in 1.75 ms. Subsequently, with the positive ICC decreasing, the negative leader gradually terminates about 65.85 ms after the first polarity reversal, and then 21.38 ms later the channel-base current slowly changes to the recognizable negative polarity as the second polarity reversal. A recoil leader generating in a previously ionized positive branch channel connects to the trunk channel, resulting in the initial continuous current pulse (ICCP) during the second negative ICC stage. Then several negative recoil leaders occur, tracing back to the previous positive channels without obvious current changes until the flash ends. Based on the analysis, the positive branch channel persistently transfers negative charge to the ground in the whole discharge process by the positive breakdown on the tip or the negative recoil leaders retrograding along the previous positive channels. The trunk channel is connected to the floating channel through negative breakdown discharges, linking at the positive charge accumulation area at the tail end of the negative leader or the positive polar end of a bidirectional leader towards the trunk channel, if the negative leader develops as a bidirectional leader later. Then, the net charge transferred to the ground is dominantly positive and the reversal of first channel current polarity occurs. With the negative leader disappearing, the supply of positive charge ceases, so the current polarity reverses again (the second reversal). Connection of the negative leader to the grounding trunk channel and continuous development of the positive leader are inferred to play an important role in reversing the two current polarities. In this case, the negative leader developing in virgin air might be initiated transversely in an ionized positive channel or from the end of a decayed positive leader branch of the ionized positive channel which is small and undistinguishable from the VHF interferometer map.

**Keywords:** leader, bipolar lightning, rocket triggered lightning, very high frequency radiation sources location

**PACS:** 92.60.Pw, 42.68.Ay

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200374