

一次多分叉多接地的空中触发闪电过程^{* 1}

李俊¹⁾²⁾ 吕伟涛¹⁾ 张义军¹⁾ 董万胜¹⁾ 郑栋¹⁾
陈绍东¹⁾³⁾ 邱实⁴⁾ 王涛¹⁾ 刘恒毅¹⁾ 陈绿文¹⁾³⁾

¹⁾(中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室,北京 100081) ²⁾(江西省气象台,南昌 330046)

³⁾(广东省广州市气象局,广州 510080) ⁴⁾(解放军理工大学气象学院,南京 211101)

摘 要

该文分析了 2007 年广州从化人工引雷试验中,6 月 30 日一次空中触发负极性闪电的光学和电学观测资料,结果表明:此次空中触发闪电的上行正先导和下行负先导分别出现了多个分叉。上行正先导早于下行负先导 4.93 ms 始发,上行正先导初始阶段的二维平均速度为 10^4 m/s 量级,后增加到 10^5 m/s 量级。下行负先导经历了 3 次分叉后分为 4 个分支接地,其中有两个接地分支一直持续发光到闪电放电结束,观测到下行负先导的二维平均速度为 1.69×10^5 m/s。小回击之后上行正先导也出现了多个分支,高速摄像和宽带干涉仪对这些分支的观测结果基本一致。小回击之后,初始长连续电流过程的持续时间为 178.6 ms。

关键词: 空中触发闪电;双向先导;多分叉;多接地点

引 言

闪电是一种具有强烈破坏效应的天气现象^[1],通常伴随强对流天气过程而发生,造成严重的人员伤亡和财产损失^[2-3]。由于自然闪电的发生具有很大的随机性^[4-5],难以对其进行近距离的综合观测^[6],人工引雷技术为人们研究闪电的物理过程、近距离获取各种雷电物理参数提供了一种比较有效的途径^[7]。常用的人工引雷技术有两种触发方式^[8]:地面触发方式,即火箭拖带的细金属线直接接地;空中触发方式,即火箭拖带的细金属不接地,触发的闪电过程包含了下行先导的发展、传输以及接地过程,在一定程度上能够模拟自然闪电的下行先导-回击过程^[9]。在过去的研究中,人们在空中触发闪电的观测和分析方面已取得了一些成果,但迄今为止,具有多接地点和多分叉通道的空中触发闪电个例还很少,对闪电通道产生多分叉和多接地行为的物理机制还缺乏深入认识。在 2007 年广州从化人工引雷试验中,6 月 30 日 13:58:33(北京时)的空中触发闪电具有 4 个

接地点,上行先导也出现了多个分支。

1 观测设备和资料获取

从 2006 年开始,中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室每年夏季都在广东省从化市开展人工引雷和自然闪电观测试验。2007 年 6 月 30 日,试验人员发射了一枚尾部拖带接地金属导线的火箭,由于导线在距引流杆约 11 m 处被拽断,最终形成一次空中触发闪电。虽然未能获得闪电电流的直接测量数据(未击中引流杆),但同步观测记录包括了高速摄像、电场变化(由快、慢天线测量)、电晕放电、磁场变化以及干涉仪定位资料。光学观测点距离引流杆 630 m,使用的高速摄像机为 Red Lake 公司生产的 MotionPro HS-4 型数字化高速黑白摄像机,采样率设置为 5000 幅/s,记录时间长度为 1.6 s。快、慢天线的放电时间常数分别为 2 ms 和 6 s;用于电晕电流测量的电阻值为 2 k Ω ,金属尖端距离地面高度为 1 m;磁天线的带宽为 50 kHz~30 MHz;干涉仪天线的带宽为 25~290 MHz。

* 国家自然科学基金项目(40605004,40875003)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)200706022)和中国气象科学研究院基本科研业务费专项资助。

2009-03-18 收到,2009-11-20 收到再改稿。

2 资料分析

图1是此次空中触发闪电-10~40 ms的光学、电学和磁场变化的同步观测记录,零时刻为观测系统的触发时刻。本文分析时采用闪电通道所在区域内所有像素点的灰度值之和(闪电通道的相对积分亮度)来表征闪电通道的亮度情况,考虑到在引雷过程中金属汽化部分存在余晖现象^[10],所以计算相对积分亮度时只考虑空气电离通道对应的像素。由相对积分亮度变化可知此次空中触发闪电在小回击后的初始连续电流过程的持续时间为178.6 ms,主要发光集中在小回击及其后的15 ms内。

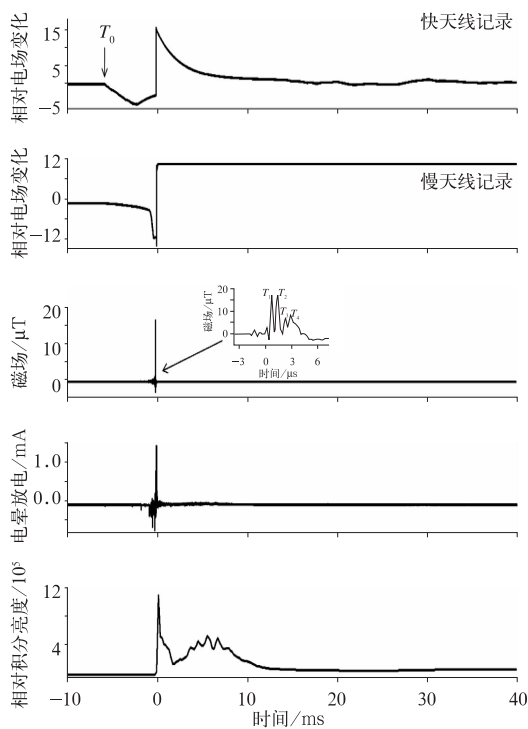


图1 -10~40 ms的相对电场变化、磁场变化、电晕电流和闪电通道相对积分亮度变化的波形

Fig. 1 The records of fast and slow antenna, corona current, magnetic loop antenna, luminosity from -10 ms to 40 ms

2.1 小回击之前的双向先导过程

2.1.1 下行负先导的始发、传播和接地

下行负先导由距地面约170 m的导线下端始发,之后分别在离地面约140 m,60 m和25 m高度处发生了分叉,共产生了4个接地分支,各分支的二维发展速度均在 10^5 m/s量级,变化范围依次为

$2.04 \times 10^5 \sim 2.24 \times 10^5$ m/s(A)、 $>4.62 \times 10^5$ m/s(B)、 $>5.03 \times 10^5$ m/s(C)和 $1.05 \times 10^5 \sim 1.42 \times 10^5$ m/s(D)。总体上下行负先导在小回击前的二维平均速度为 1.69×10^5 m/s。图2中-0.76~-0.68 ms慢电场变化呈现明显的小阶梯特征,在磁天线和电晕电流记录中也有对应的变化,表明下行负先导在激发之后是以梯级的方式传输,5个比较明显的脉冲时间间隔分别为36 μs,15 μs,12 μs和15 μs。磁环天线记录到4个比较明显的脉冲波形(图1磁场强度放大图),出现脉冲峰值的时刻依次为:0.7 μs,1.3 μs,2.3 μs和2.9 μs,推测这对应的是4个接地分支的接地过程。

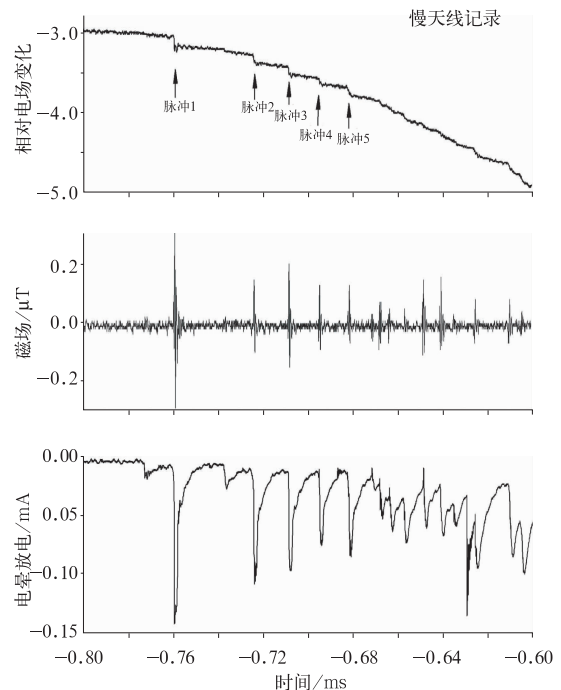


图2 -0.8~-0.6 ms相对电场慢变化、磁场变化和电晕电流的波形

Fig. 2 The records of slow antenna, corona current, magnetic loop antenna from -0.8 ms to -0.6 ms

2.1.2 上行正先导的始发和传播

从-5.69 ms(图1中的 T_0)起观测到上行正先导起始和发展对应的电场变化,但在-0.6 ms之前,高速摄像系统没有观测到发光,这是由于其在初始传播阶段较弱,且此次引雷是在白天进行,背景光较强也会导致较弱的发光难以从背景中分辨出来。此次空中触发闪电过程中,下行负先导在-0.76 ms始发,上行正先导早于下行负先导4.93 ms始发,和

前人观测结果一致^[11-12]。

下行负先导的始发和传播会增强通道中的电流,促进上行正先导的发展和传播。图 3 中 -0.4 ms 时观测到上行正先导传播所经过的通道,导线顶端距地面 335 m,上行正先导尖部距地面

550 m,估计此前上行正先导传播的二维平均发展速度为 5.2×10^4 m/s(5.29 ms 内传输了 275 m),之后两个 0.2 ms 时间间隔内,上行正先导二维速度分别为 1.64×10^5 m/s 和 1.66×10^5 m/s,由此推测上行正先导的速度是逐渐增加的。

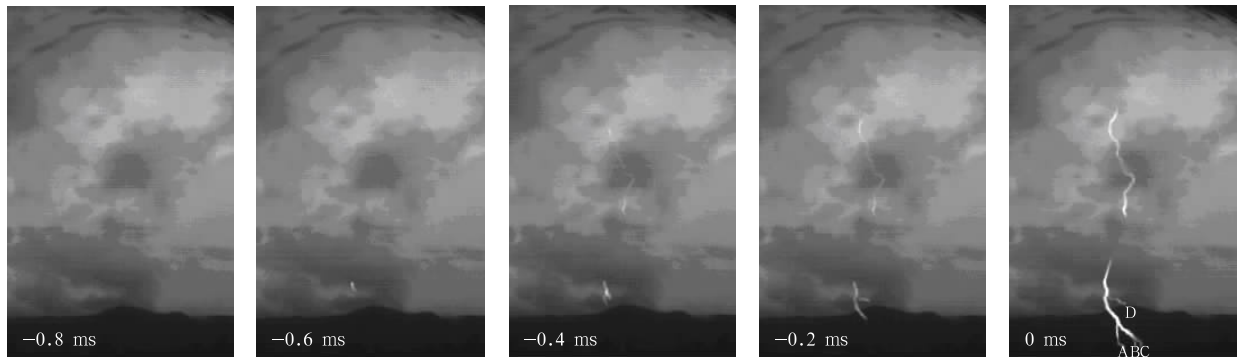


图 3 -0.8~0 ms 的高速摄像图片 (为便于观看,提高了-0.8~-0.2 ms 图像的对对比度)
 Fig. 3 Frame sequence of bi-directional leader from -0.8 ms to 0 ms
 (frame -0.8 ms to frame -0.2 ms has been processed)

2.2 小回击及其后的长连续电流过程

图 4 为 0.2~5.6 ms 部分高速摄像资料,反映了上行正先导分为不同分支入云的情况。在 0.2 ms,小回击发生,闪电通道亮度陡然增加,在其

后整个过程中,闪电通道中导线汽化部分亮度明显高于空气离化通道。在 0.4 ms,接地分支中上部的分支消失,左下的分支也明显变暗;上行正先导出现分叉,分叉点高度约 550 m,之后上行正先导的左右

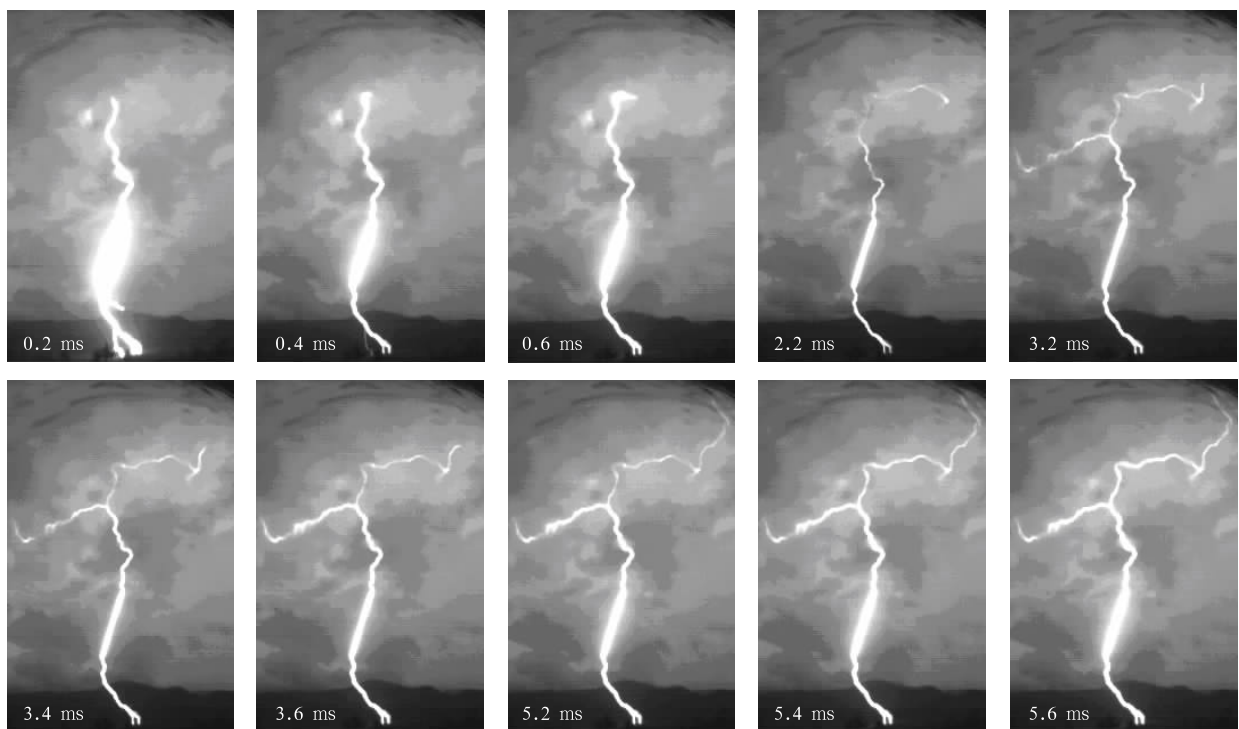


图 4 0.2~5.6 ms 的部分高速摄像资料

Fig. 4 Frame sequence of bi-directional leader about the mini return stroke and initial long continue current process

两个分支分别发展。在 0.6 ms, 左下的接地分支消失, 接地的分支变为两个, 并一直持续到放电过程结束。在 2.2 ms, 上行右分支出现一个新的分支并很快入云, 从上行正先导出现左、右两分支到右分支再次分叉, 上行右分支的二维平均速度为 1.12×10^5 m/s。在 3.4 ms, 左分支头部入云, 其二维平均速度为 1.27×10^5 m/s。在 5.6 ms, 最右边的上行正先导分支超出了高速摄像机的视野范围, 2.2~5.4 ms 其二维平均速度为 0.78×10^5 m/s。

图 5a 为此次空中触发闪电通道的干涉仪定位结果, 图 5b 为高速摄像机视野范围内闪电通道发展

和分支情况合成图, 图中标出了下行负先导的接地分支(A~D)和上行正先导的各个分支(1~5)。在小回击发生之后的 23 ms 之内上行正先导分成了 4 个不同的分支进行传播, 其中值得注意的是分支 2, 根据发生的位置进行估算, 这一支上行正先导应该对应于图 4 中 0.2 ms 至 0.6 ms 上部通道左侧出现的亮区, 推测是由于云层的阻挡而无法从图像上分辨这一分支。在图 4(2.2 ms)可见分支 3 的产生及其入云, 干涉仪对分支 3 的辐射点也较好地进行了定位。分支 5 是干涉仪记录到的长连续电流过程结束之后云内闪电通道的发展。

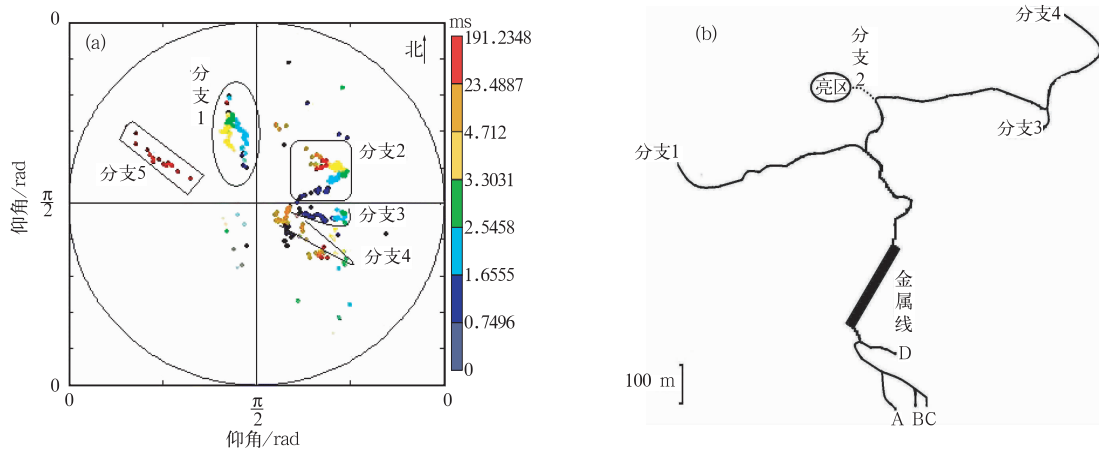


图 5 干涉仪对闪电通道的定位结果示意图(a)和闪电通道的光学合成图(b)

Fig. 5 Location image of broadband interferometers (a) and image of the altitude-triggered lightning channel (b)

3 对多分叉多接地现象的探讨

自然闪电的下行负先导发展的空间尺度很大(数公里), 空间电场分布差异大, 因此经常会出现多接地点, 空中触发闪电的下行负先导一般只发展 200~300 m, 很少出现多接地点^[13]。研究表明^[14]: 在雷暴云当顶的条件下, 电晕电流密度可达 2.0 nA/m^2 , 空间电荷密度在 100 m 的高度以下可达 1.1 nC/m^3 , 传导电流可达 2.0 nA/m^2 , 并延伸到 1000 m 高度, 形成 0.1 nC/m^3 和 1.0 nA/m^2 的电荷密度和电流密度。广州从化引雷试验场位于丘陵地区, 周围有较高的山体, 树木茂盛, 自然尖端上电晕放电导致的空间电荷在各种条件的作用下形成近地面附近极其复杂的电荷结构, 这可能是造成此次空中触发闪电出现多分叉多接地的主要原因。

对比前人对自然闪电多接地现象和成因研究^[15], 此次空中触发闪电有明显不同。此次空中触发闪电下行负先导的发展与云内电荷积累关系不大, 下行负先导传播所需的电荷来自金属丝和双向先导建立的电离通道在环境电场中产生的感应电荷; 下行负先导产生的 4 个接地点位置存在较大差异, 其中一个接地点出现在高出地面百米左右的山头上; 空中触发闪电小回击发生时闪电通道内电流的峰值也远小于一般自然闪电回击电流的峰值。

4 小结

2007 年 6 月 30 日, 广东从化的人工引雷试验中, 一次空中触发闪电过程出现了 4 个不同的接地点, 其中有两个接地分支在小回击之后的初始长连续电流过程中一直存在; 上行正先导的始发早于下

行负先导 4.93 ms,起始后约 5.29 ms 内的二维平均速度为 5.2×10^4 m/s,小回击之前 0.4 ms 内的二维平均速度为 1.65×10^5 m/s,下行负先导的二维平均速度为 1.69×10^5 m/s;下行负先导的始发对上行正先导的发展具有促进作用,下行负先导的发展使上行正先导的发光变强;小回击发生之后,上行正先导出现了 4 个不同分支入云,平均速度为 1.05×10^5 m/s。

空中触发闪电的下行先导及其接地过程能够在一定程度上模拟自然闪电的接地过程,利用多种高时空分辨率的光学和电学设备对其进行观测,对于研究自然闪电雷击物理过程、探索有效的防雷技术具有极其重要的意义。在今后的试验中,将继续进行人工触发闪电试验,以获得更多的观测资料对空中触发闪电双向先导的始发和传输、小回击以及初始连续电流等过程进行分析。

参 考 文 献

- [1] Uman M A. All about Lightning. New York: Dover Publications Inc, 1986:17-24.
- [2] 马明,吕伟涛,张义军,等. 1997—2006 年我国雷电灾情特征. 应用气象学报, 2008, 9(4):393-400.
- [3] 马明,吕伟涛,张义军,等. 我国雷电灾害及相关因素分析. 地球科学进展, 2008, 23(8):856-865.
- [4] Volland Hans. Atmospheric Electrodynamics. New York: Dover Publications Inc, 1984:43-56.
- [5] 李俊,张义军,吕伟涛,等. 一次多回击自然闪电的高速摄像观测. 应用气象学报, 2008, 19(4):401-411.
- [6] 张义军,孟青,马明,等. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报, 2006, 17(5):611-620.
- [7] Uman M A. The Lightning Discharge. Florida: Academic Press Inc, 1987:205-230.
- [8] 王道洪,郗秀书,郭昌明. 雷电与人工引雷. 上海:上海交通大学出版社, 2000:150-218.
- [9] Rakov Vladimir A, Martin A Uman. Lightning Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003:265-307.
- [10] Lu Weitao, Zhang Yijun, Zhou Xiuji, et al. Analysis of channel luminosity characteristics in rocket-triggered lightning. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 22(3):362-374.
- [11] Lu Weitao, Zhang Yijun, Zhou Xiuji, et al. Simultaneous optical and electrical observations on the initial processes of altitude-triggered negative lightning. *Atmospheric Research*, 91(2-4): 353-359, doi:10.1016/j.atmosres.2008.01.011, 2009.
- [12] Lalanda P, Bondious-Clergerie A, Laroche P, et al. Leader properties determined with triggered lightning techniques. *J G R*, 1998, 103:14109-14115.
- [13] 王才伟,张义军,肖庆复,等. 空中触发闪电的下行先导及其接地行为. 高原气象, 1998, 17(1):24-33.
- [14] 郗秀书,言穆弘. 雷暴下近地面电特性及其对人工引雷的影响. 高原气象, 1996, 15(3):293-302.
- [15] 孔祥贞,郗秀书,王才伟,等. 首次回击具有双接地点的地闪光学和电学特性分析. 高原气象, 2003, 22(3):259-267.

An Altitude-triggered Lightning with Multiple Branches and Ground Contacts

Li Jun¹⁾²⁾ Lü Weitao¹⁾ Zhang Yijun¹⁾ Dong Wansheng¹⁾ Zheng Dong¹⁾
Chen Shaodong¹⁾³⁾ Qiu Shi⁴⁾ Wang Tao¹⁾ Liu Hengyi¹⁾ Chen Luwen¹⁾³⁾

¹⁾ (*Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330046*)

³⁾ (*Guangzhou Meteorological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510080*)

⁴⁾ (*Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101*)

Abstract

Field experiments on artificially rocket-triggered lightning are conducted in summer of 2007 in Conghua, Guangdong Province by Lightning Physics and Protection Engineering Laboratory of Chinese Academy of Meteorological Sciences. The luminosity characteristics of lightning are captured simultaneously by a Redlake MotionPro HS-4 high-speed camera at 5000 frames per second (fps) 630 m away. Field mill, magnetic loop antenna, broadband interferometers, slow antenna and fast antenna are installed at the experiment site. The time constants of slow and fast antenna are 6 s and 2 ms respectively, and the bandwidth of broadband interferometers to locate the lightning is from 25 MHz to 290 MHz. One lightning is successfully triggered at 13:58:33 30 June 2007. The top of the wire is 335 m height and the bottom of it is 170 m height at that time. The records of the electric field on the land surface show that it is a negative altitude-triggered lightning. No return stroke is observed in luminosity, and the initial continue current process of this flash is 178.6 ms. Bi-directional leader process occurs before mini return stroke and upward stepped leader branches of this altitude-triggered lightning occur after that. The upward positive leader appears 4.93 ms earlier before the downward negative leader. The upward stepped leader propagates at an average speed of the order of 10^4 m/s in its initial stage, and then becomes 10^5 m/s in magnitude. After the downward negative leader appears, the upward positive leader channel becomes brighter than before. The downward negative leader has 3 bifurcation points and produces 4 different ground contacts, and two branches connects to ground persisted during the initial continue current process. The average speed of the downward stepped leader is 1.69×10^5 m/s. After mini return stroke, the upward positive leader above the wire channel propagates along several different branch channels into the cloud, and the average speed of it is 1.05×10^5 m/s. In this experiment, the inducing charge provides the charge of the leader to spread, and the environmental electric field may play a decisive role to the multiple branches and multiple ground contacts of this altitude-triggered lightning.

Key words: altitude-triggered lightning; bi-directional leader; multiple branches; multiple ground contacts