

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.

利用低频磁场天线遥感测量人工引雷中的 初始连续电流

樊艳峰^{1,2} 陆高鹏^{1,3} 蒋如斌^{1,3} 张鸿波^{1,2} 刘明远¹ 郟秀书^{1,3}

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

³ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 2014 年夏季的山东人工引雷实验中, 我们利用高灵敏度宽频段磁场天线在距引雷点 78 m 的距离上开展了对人工引雷初始连续电流过程的遥感测量。通过分析实验期间 5 次人工引雷的综合观测数据, 发现磁场遥感方法对人工引雷中特有的初始连续电流有很好的反演效果。通过对 78 m 距离上获得的磁场测量信号进行积分处理, 能够有效地抑制测量过程中白噪声的影响, 从而反演得到初始连续电流的低噪声时变波形。该方法为获取空中引雷实验中的初始连续电流波形提供了一种解决方案, 同时也可用于反演近距离自然闪电中地闪回击中的长连续电流的时变波形。

关键词 人工引雷 低频磁场天线 初始连续电流 长连续电流

文章编号 1006-9895(2017)05-1027-10

中图分类号 P427.32

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16248

Application of Low-frequency Magnetic Sensor for Remote Measurement of the Initial Continuous Current in Rocket-triggering Lightning

FAN Yanfeng^{1,2}, LU Gaopeng^{1,3}, JIANG Rubin^{1,3}, ZHANG Hongbo^{1,2}, LIU Mingyuan¹,
and QIE Xiushu^{1,3}

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract We present a new method to remotely measure the initial continuous current in classical rocket-triggering lightning using a compact low-frequency magnetic sensor deployed at 78-m distance from the channel base. The current waveform retrieved from the numerical integration of close magnetic signals shows very well the general feature and all the slow variations (such as the initial continuous current pulse) embedded in the channel base current measured with a

收稿日期 2016-10-20; 网络预出版日期 2017-02-27

作者简介 樊艳峰, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事雷电电磁场遥感与数值模拟等方面的研究。E-mail: fanyanfeng@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陆高鹏, E-mail: gaopenglu@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) 2014CB441405, 中国科学院“百人计划”项目 2013068, 国家自然科学基金项目 41305005、41622501

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2014CB441405), the One Hundred Talent Program of Chinese Academy of Sciences (Grant 2013068), National Natural Science Foundation of China (Grants 41305005 and 41622501)

shunt. Compared with the shunt measurement, the new method has the advantage of significantly reduced noise. This method can be applied to remotely probe the initial continuous current in upward lightning from high objects and altitude-triggering lightning, as well as long continuing current in natural cloud-to-ground lightning at a close range.

Keywords Rocket-triggering lightning, Low-frequency magnetic sensor, Initial continuous current, Long continuing current

1 引言

人工引雷是研究闪电过程物理机制的重要技术手段。作为一种可控性较高的闪电测量手段,该方法已被用于研究闪电放电,特别是接地过程的特征描述(Hubert et al., 1984; Rakov et al., 1998; Qie et al., 2007, 2009)。同自然闪电的观测相比,人工引雷实验的一大优势是闪电电流汇入地面的通道是已知的,因此可以通过设计场地观测实验测量闪电电流波形。山东人工引雷实验(SHATLE)从2005年开始,每年夏季都在山东省滨州市沾化区境内通过发射拖曳细钢丝的小火箭开展人工引雷的综合观测(Qie et al., 2007, 2009; 郗秀书等, 2012; Lu et al., 2014),实验中通过将同轴分流器串联在闪电电流连接到地的放电通路中实现对闪电电流的直接测量,而且通过测量 Pearson 线圈上的电磁感应强度可以对闪电电流进行间接反演,两种方法得到的闪电电流结果基本一致。

图 1a 为 2013 年 8 月 2 日山东人工引雷实验中通道底部测量到的电流波形,从图中可以看出,一次完整的人工引雷实验其电流通常包括三个部分,即最开始出现的初始电流脉冲簇(图 1a 中小图所示),这一过程表明钢丝头部开始持续始发向上发展的先导;之后是时间尺度约为几十到几百毫秒的初始连续电流(ICC)阶段,其上通常叠加若干个 ICC 脉冲(ICCIP);最后是可能伴随的若干次回击(RS)电流(图 1a 显示了此次实验的六次回击电流)。由于实验的设计中闪电电流测量设备的量程均较大(40 kA 和 2 kA 两种),使得测量设备的分辨率较小,很难对包含较多弱放电过程的 ICC 阶段(例如幅值较小的 ICCIP)进行准确测量,因此需要在已有通道底部电流测量手段的基础上发展具有较高灵敏度的探测方法,遗憾的是在 2013 年的山东人工引雷实验中并没有开展这方面的观测。

图 1b 给出了图 1a 中的 ICC 和单个回击电流脉冲的频谱分析结果,从中可以发现,ICC 与回击电流相比,其包含的信号频段更低,主要集中在 6 kHz 以下,且高于 20 kHz 的信号已无法同噪声区分。根

据这一结论,我们设计了专门的低频磁场天线并投入到 2014 年的山东人工引雷实验观测中(Lu et al., 2016; Zhang et al., 2016),通过测量人工引雷闪电通道近距离处的磁场,尝试了一种反演人工引雷中初始连续电流时变波形的遥感方法,这种方法可以克服通道底部测量设备对闪电弱电流分辨能力不足的问题,能够比较准确地实现对初始连续电流的重构,并为获取空中引雷实验中的初始连续电流波形提供了可靠的技术手段。

2 测量和数据

本文所使用的数据来自 2014 年山东人工引雷实验,实验中通过带宽为 0~3.2 MHz 的 5 mΩ 同轴分流器对雷电流进行直接测量,通过测量带宽为 0.9 Hz~1.5 MHz 的 Pearson 线圈上的电磁感应强度实现对雷电流的间接测量。在距离引流杆 78 m 处架设了如图 2 所示的两根正交磁线圈组成的低频磁场天线,其中一根线圈与地面水平放置(并沿以引雷点为中心的圆切向方向),另外一根与地面垂直放置,用以接收在该方向上可能存在的磁场分量,图中也给出了该套天线的频率响应曲线。根据实验室内的标定结果,磁传感器的 3 dB 带宽为 6 kHz~340 kHz,在低于 6 kHz 的频率上,磁传感器的增益随着频率的增加而增加(这主要取决于磁线圈的本征属性),实际测量到的是磁场变化率(dB/dt)信号,这也是本文中初始连续电流近距离遥感测量方法的工作频段。

在人工引雷实验中,火箭拖曳金属线(在 SHATLE 观测中使用直径 0.2 mm,单位长度电阻为 7 Ω m⁻¹的钢丝)以 100 m s⁻¹的设计速度上升。由于钢丝始终保持接地状态,而地面以上的电势是不断减小的(考虑负极性人工引雷的情形)。因此,当上升钢丝终端附近的电场达到击穿阈值时,一个持续性的正先导将形成并以 1×10⁴ m s⁻¹到 1×10⁵ m s⁻¹的速度向上传播(Biagi et al., 2009; Jiang et al., 2013; Sun et al., 2014)。一般在正先导始发 5~10 毫秒之后,正先导通道在高速摄像上持续可见,即对地的电荷传输进入初始连续电流阶段。2014 年 5

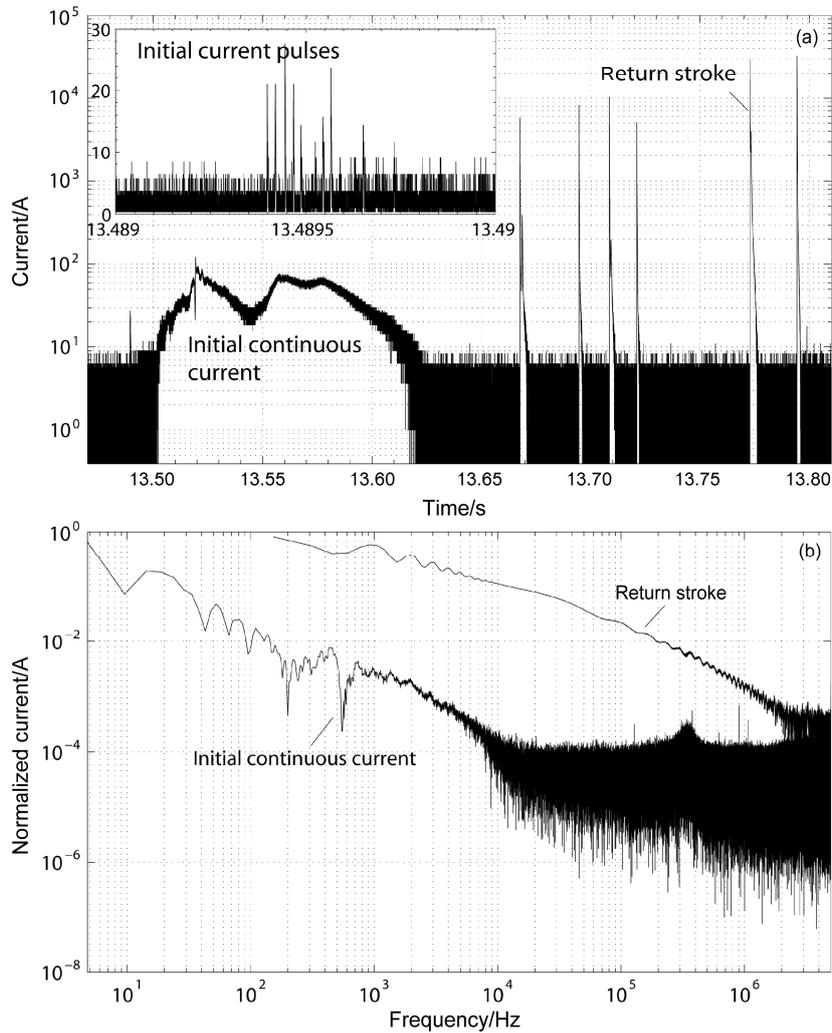


图1 2013年8月2日21:37(协调世界时,下同)的一次人工引雷测量结果:(a)通道底部测量的电流波形;(b)初始连续电流和回击电流傅里叶变换结果

Fig. 1 Measurements of (a) channel base current and (b) its FFT (Fast Fourier Transform) results for the triggering lightning at 2137 UTC of August 2, 2013

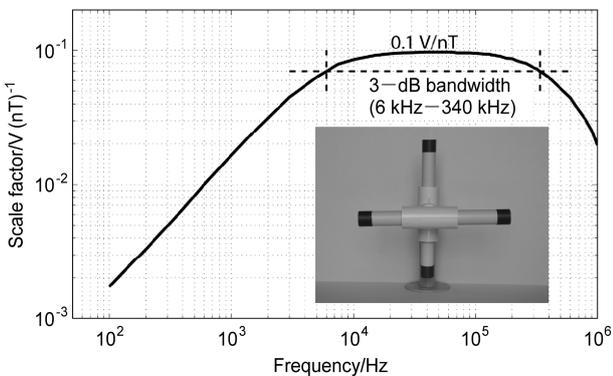


图2 磁场天线及其频率响应曲线(实验室标定结果)

Fig. 2 The magnetic sensor used in SHATLE and its frequency response from the laboratory calibration

次人工引雷的正先导始发高度 ($H_{inception}$, 单位: m) 和初始连续电流阶段可见的通道长度 ($H_{visible}$, 单位: m) (包括引雷钢丝部分) 如表 1 所列。由于所采用低频磁场天线较高的灵敏度, 表中除 8 月 18 日 04:17:18 (协调世界时, 下同) 的引雷实验外, 其它 4 次引雷的水平方向磁场测量结果均存在一定程度的饱和。

图 3 给出了上文中提到的唯一一次初始连续电流阶段水平方向磁场测量没有饱和的个例, 需要说明的是本文定义与负极性人工引雷对应的电流脉冲产生的磁场为正极性, 其中图 3a 为通道底部电流测量结果, 图 3b 为对应的 78 m 处水平方向磁场测量结果。从图中可以看出, 磁场测量结果能够很

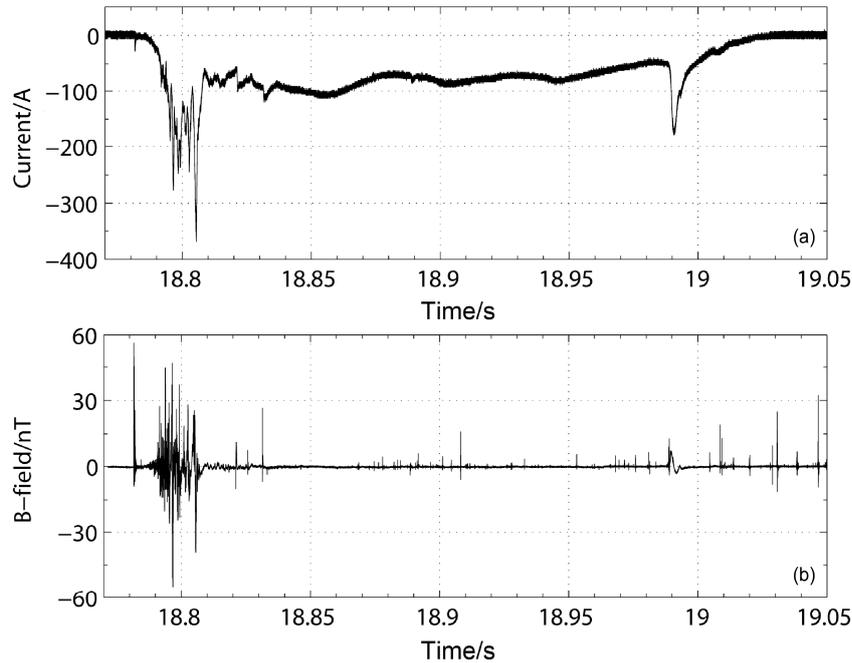


图3 2014年8月18日04:17的一次人工引雷测量结果：(a)通道底部测量的初始连续电流波形；(b)78 m处低频磁场天线的测量波形。
Fig. 3 Measurements of (a) initial continuous current waveform at the channel base, and (b) low-frequency magnetic signals at 78-m distance for the triggering lightning at 0417 UTC of August 18, 2014

好地反映出所采用的磁传感器的一些频率响应特征，即对于起始阶段同正先导梯级传播过程相关的时间尺度较短 ($< 10 \mu\text{s}$) 的初始电流脉冲，磁传感器表现出较高增益，而对于之后的一些时间尺度较长的电流过程（如 18.99 s 附近的一次 ICCP），磁传感器的增益较低。

表 1 2014 年夏季人工引雷正先导始发高度和闪电通道持续发光可见时通道高度

Table 1 List of rocket-triggering lightning during summer of 2014

	$H_{\text{inception}}/$ m	$H_{\text{visible}}/$ m	通道底部电 流类型	光学观测 数据*
8月13日 04:10:32	260	>410	ICC	M310
8月18日 04:13:28	140	560	ICC	M310, V711
8月18日 04:17:18	245	642	ICC-RSs 和 CC*	M310, V711
8月23日 16:11:06	360	680	ICC	M310, V711, UFO
8月23日 16:29:52	152	620	ICC	M310, V711, UFO

* M310 和 V711 为高速摄像机, UFO 为低光度成像仪, CC 为连续电流。

3 方法及理论基础

在人工引雷 ICC 阶段，雷暴云体及其周围环境中的负电荷沿着先导通道传输至钢丝顶端，之后负电荷通过钢丝或者钢丝熔断后形成的通路以近似

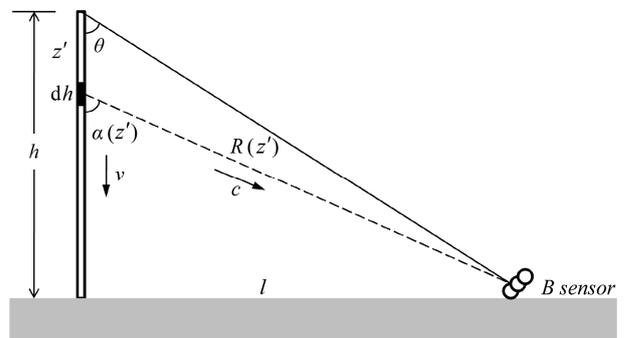


图4 电磁辐射传输示意图
Fig. 4 Schematic diagram of electromagnetic radiation transmission

垂直的方式持续传输至接地系统 (Wang et al., 1999; Qie et al., 2011)。负电荷在向下传输时在 78 m 观测点处辐射产生的磁场可由传输线模式计算得到 (Yang et al., 2010; 樊艳峰等, 2017)，其电磁辐射模型如图 4 所示，其中 h 为电流源起始位置距离地面的高度， θ 为钢丝顶端与磁场天线的夹角， dh 为电流元所处的某一位置。根据表 1 结果，人工引雷实验中闪电通道持续发光的通道高度均在 400 m 以上，考虑到雷暴云的遮挡以及摄像机视野的局限， h 大于该数值。 c 为电磁波在大气中的传播速度（近似取为真空中光速，即 $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ）， v 为

电流元沿闪电通道向下传播的速度, l 为磁场天线与引流杆的水平距离即 78 m。

假设地面电导率无穷大, 观测点处的磁场 B 可以通过公式(1)计算(Uman et al., 1975; Thottappillil and Rakov, 2007):

$$B(t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 c^2} \int_0^h \left(\frac{\sin \alpha(z')}{R^2(z')} i(z', t - \frac{R(z')}{c}) + \frac{\sin \alpha(z')}{cR(z')} \frac{\partial i(z', t - R(z')/c)}{\partial t} \right) dz' \quad (1)$$

其中, z' 为电流元距离通道顶端的长度, $R(z')$ 为电流元与磁场天线的距离, $\alpha(z')$ 为电流元与磁场天线的夹角, 考虑到观测点处的视在电流元位置与其实际位置有偏差, 所以电流元的表达式中加入了推迟势, 即为 $i(z', t - \frac{R(z')}{c})$ 。公式右边的第一项和第二项分别称为闪电磁场的感应场分量 (记为 B_i) 和辐射场分量 (记为 B_r)。由于电流是从通道顶端向地面传输, 所以上式计算中从通道顶端积分至地面。考虑到电流在钢丝上的传播速度在 10^8 m s^{-1} 数量级, 且磁场天线与引流杆的水平距离仅为 78 m, 所以电磁场传播延迟远小于 ICC 时间尺度, 因此可以对上述电磁辐射模型进行一些假设, 即认为在任意时刻通道上的电流都是相同的, 电荷源位于雷暴云内通道的顶部。

Qie et al. (2014) 对 2005 年至 2011 年山东人工引雷实验中获得的 23 次 ICCP 进行了统计分析, 发现其峰值电流几何平均值为 90 A, 半峰值宽度为 $712 \mu\text{s}$ 。为了对 ICC 阶段 78 m 处磁天线接收到的磁场分量定量分析, 本文采用 Heidler 函数 (Heidler, 1985) 构造一个符合统计平均的 ICCP 电流波形,

并选取不同通道高度应用于上述模式对闪电电流辐射产生的磁场进行计算, 构造出的 ICCP 电流波形以及磁场计算结果如图 5 所示, 结果表明在 ICCP 电流尺度下, 不论通道高度如何, 电流辐射产生的磁场其感应场分量始终占主导地位, 辐射场分量可以忽略不计。由于磁场的辐射场分量与电流元随时间的变化率相关, 因此可以推断时间尺度更长的 ICC 同样符合这个结论。在电流信号沿着传输线向下传播时, 总磁场大小等于通道中所有电流元产生磁场的积分, 由于电磁波在传输过程中随距离衰减, 因此观测点处的磁场主要来自距离其较近的辐射源的贡献, 较远的辐射源则贡献较小。从计算结果可以发现, 当通道高度大于 200 m 时, 增加通道高度对 78 m 处磁场的影响已经很小, 而当通道高度大于 400 m 时, 磁场已基本不随通道高度的增加而变化, 这表明电流流经通道距地 400 m 以下部分时产生的感应场分量是总磁场最主要的来源。

之前的分析表明 ICC 阶段信号频率主要集中在 6 kHz 以下, 对于这一频段的信号, 实验中所用的低频磁场天线相当于 dB/dt 传感器, 通过对测量信号的时间积分可以得到磁场。磁场天线在数据采集过程中会不可避免地引入测量白噪声 (记为 B_n), 由于 ICC 阶段磁场的辐射场分量可以忽略不计, 因此低频磁场天线测到的信号是由感应场分量和白噪声组成, 考虑到白噪声具有随机性, 因此对其时间积分结果趋于 0, 即 $\int_{t'=t_0}^t \frac{\text{dB}_n}{\text{dt}'} \text{dt}' \approx 0$, 而感应场分量满足静磁学中的 Biot-Savart 定律:

$$B_i(t) = \int_{t'=t_0}^t \frac{\text{dB}_i}{\text{dt}'} \text{dt}' = \alpha \cdot h(t) \cdot I(t), \quad (2)$$

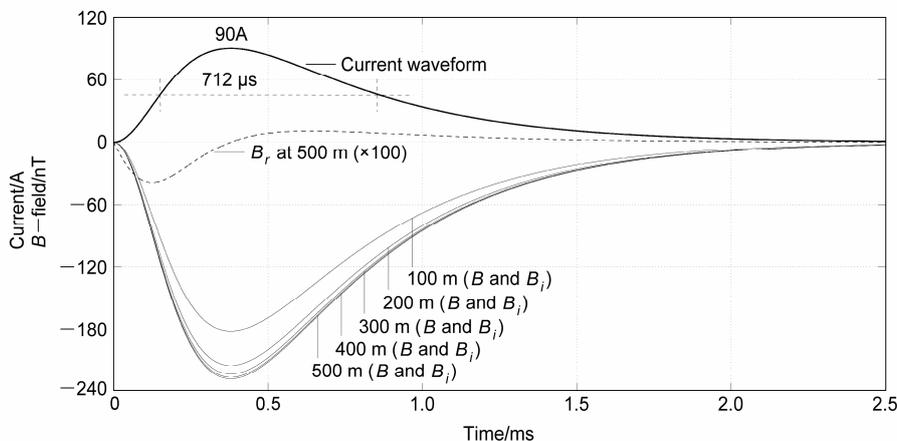


图 5 ICCP 在 78 m 水平距离处辐射产生的磁场 (选取了五个不同高度的闪电通道)

Fig. 5 Magnetic field of ICCP (initial continuous current pulse) at 78-m horizontal distance for five different heights

其中, $h(t)$ 为随时间变化的闪电通道高度, 上文已经证明当初始连续电流形成时, 由于通道高度远大于 400 m, 其变化对磁场的影响已经很小, 因此 $h(t)$ 可以当做常数处理, α 为待定比例系数, 假设反演系数 $\beta = \frac{1}{\alpha \cdot h(t)}$, 则公式 (2) 可改写为

$$I(t) = \beta \int_{t'=t_0}^t \frac{dB_t}{dt'} dt', \quad (3)$$

其中, 系数 β 的取值同磁传感器到闪电通道底部的距离有关。根据公式 (3) 可知, 初始连续电流的反演能够通过磁场天线测量到的磁场进行时间积分的方法实现。

4 结果和分析

4.1 未饱和磁场数据反演初始连续电流结果

利用上述方法, 本节重点分析 2014 年 8 月 18 日 04:17:18 唯一一次水平方向磁场测量未饱和的人工引雷实验个例, 有关通道底部电流和 78 m 磁场测量的结果如图 3 所示。对该人工引雷的初始连续电流的反演结果如图 6 所示。与实测结果 (见图 3a) 相比, 电流波形上的绝大多数特征均得到了很好的体现, 包括初始电流变化 (ICV) 过程和一些强度较弱的 ICCP 等, 并且由于观测结果上叠加的白噪声在积分中相互抵消, 使得反演得到的电流波形更加平滑, 对弱电流的解析程度也更强。

ICV 是人工引雷通道底部初始电流波形中一个独特的过程, 该过程同引雷钢丝的熔断和闪电电荷传输通道的重建有关 (Rakov et al., 2003), 因此一

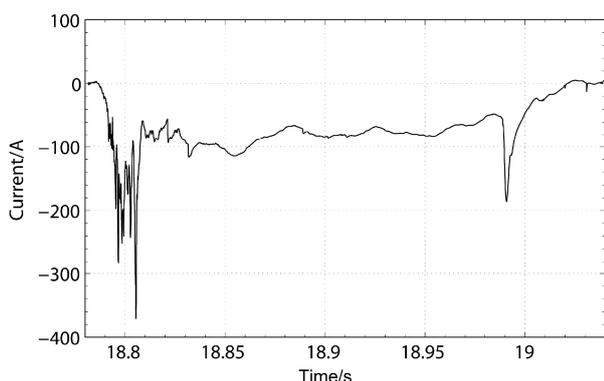


图 6 对 2014 年 8 月 18 日 04:17 人工引雷实验中 78 m 处测量的磁场信号数值积分得到的初始连续电流波形

Fig. 6 Initial continuous current waveform reconstructed from the numerical integration of low-frequency magnetic signals recorded at 78-m distance from the channel base during the triggering lightning at 0417 UTC of August 18, 2014

般具有比较复杂的变化波形, 对该过程电流波形的正确反演是对测量方法的重要评价指标。

图 7 给出了 ICV 过程通道底部实测电流和数值积分反演电流的对照图, 为了能够较好地将两个波形区别开, 我们将实测电流向下平移了 50 A (下同), 可以看出反演得到的电流波形与实测波形吻合很好, 并且具有噪声水平低的优点。

ICCP 是叠加在 ICC 阶段的电流脉冲, 伴随着放电通道的突然增亮和电磁场突变 (Qie et al., 2014)。ICCP 的形成原因可能与接地通道外的负极性流光汇入或者原接地通道中正极性流光延伸产生的反冲流光过程有关。这里我们主要讨论图 3a 中 18.99 s 附近的一次持续时间约为 10 ms 的 ICCP。

图 8a 为与此 ICCP 对应的 78 m 处磁场信号, 图中清楚地显示了 ICCP 的起始阶段 (即负极性流光或反冲流光) 及其通过垂直闪电通道流入到地面时的近场效应 (时间尺度较长的磁脉冲), 这在 2014 年的人工引雷实验中被普遍观测到。图 8b 为通道底部实测 ICCP 波形和数值积分反演得到的 ICCP 波形对比, 同样, 反演结果能够比较准确地反映实测波形的特征。但另一方面, ICCP 对应的云内过程所辐射的磁场脉冲也导致了反演电流波形中出现了一些失真情况, 这是在使用本文方法反演电流时需要注意的问题。

4.2 饱和磁场数据反演初始连续电流结果

在 2014 年夏季的观测实验中, 我们采用的磁场天线具有较高的增益, 因此对于一些强度较高的低频闪电信号, 磁场测量结果会出现不同程度的局部饱和, 这对电流反演结果会造成明显的影响。图 9 为 8 月 23 日 16:11:06 人工引雷初始连续电流的 78 m 处水平方向磁场测量结果 (图 9a)、垂直方向磁场测量结果 (图 9b) 和电流测量及反演结果 (图 9c), 其中水平方向磁场在标注位置存在饱和, 饱和信号放大结果如图 9a 中插图所示, 而垂直方向磁场由于信号较小并未出现饱和, 但是其测量信噪比相对较低。利用水平方向磁场反演电流结果如图 9c 中虚线所示, 可以看出尽管在饱和的时间段上对近距离磁场的数值积分无法获得电流波形, 但其它时间段上的反演结果与实测结果能够很好地吻合, 信号饱和仅使反演结果出现一定程度的波形平移。针对信号饱和造成的电流反演不完全的问题, 我们利用水平方向和垂直方向磁场测量结果的对应关系, 通过将垂直测量获得的未饱和数据乘以特定系

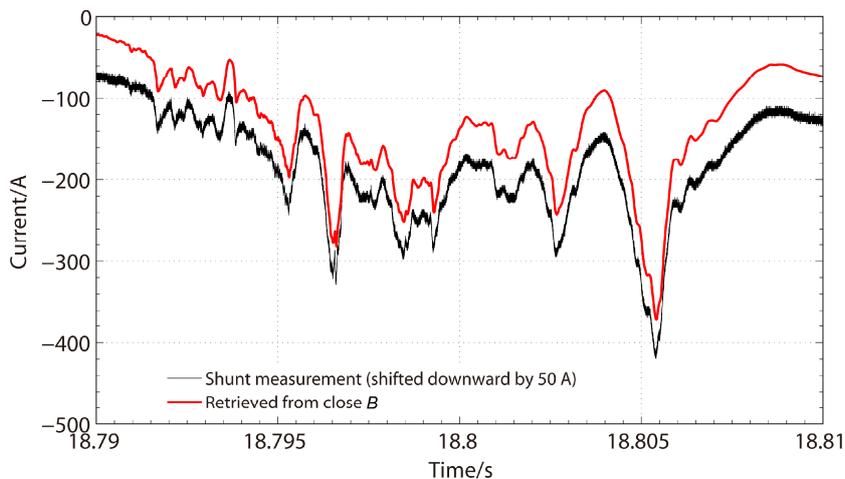


图7 对2014年8月18日04:17人工引雷实验测到的初始连续电流中复杂波形变化的数值积分反演结果
Fig. 7 Numerical integration result of the complex waveform variation in the initial continuous current measured during the triggering lightning at 0417 UTC of August 18, 2014

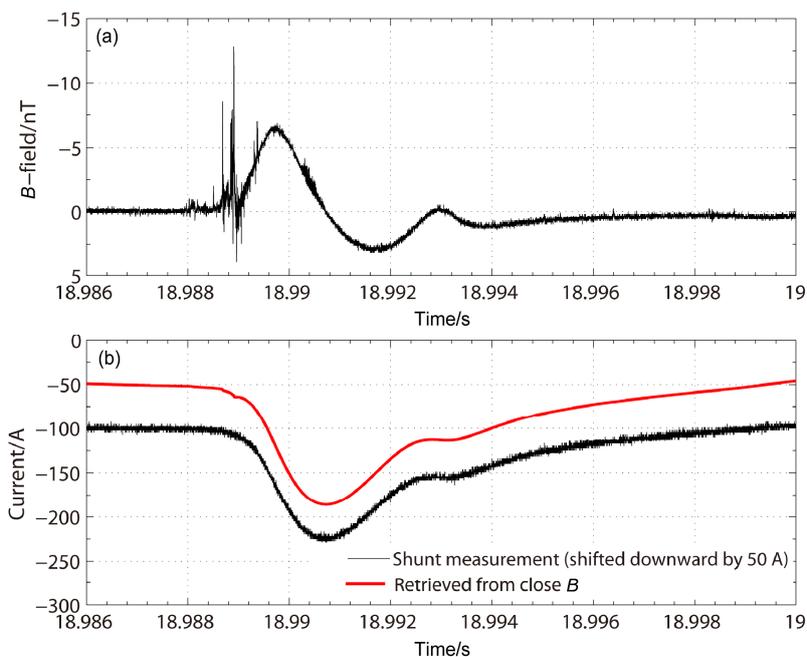


图8 对2014年8月18日04:17人工引雷实验测到的ICCP的电流波形反演：(a) 78 m 磁场信号波形；(b) 数值积分得到的电流波形及其同通道底部测量结果的比较
Fig. 8 Current waveform reconstruction for ICCP measured during the triggering lightning at 0417 UTC of August 18, 2014: (a) Magnetic signal at 78-m distance; (b) current waveform derived from the numerical integration and its comparison with the channel base current measurement

数替换水平测得的饱和数据，重构饱和补偿后的水平通道磁场信号，进而利用该重构信号对初始连续电流进行反演，结果如图 9c 中红色波形，可以看出反演结果与实测结果基本重合，表明了该饱和补偿方法的可靠性。

4.3 不同人工引雷过程反演系数对比

利用 2014 年获得的 5 次人工引雷的低频磁场

数据对初始连续电流进行反演，均获得了比较理想的结果。文章第三部分在理论分析中认为电流流经闪电通道距地 400 m 以下部分时辐射产生的磁场是总磁场最主要的来源，为了验证这一结论，我们利用最小二乘法分别计算得到了 5 次实验中最优反演结果情况下对应的反演系数 β ，同时给出了每次人工引雷的光学观测结果，如图 10 所示，其中图 10a、

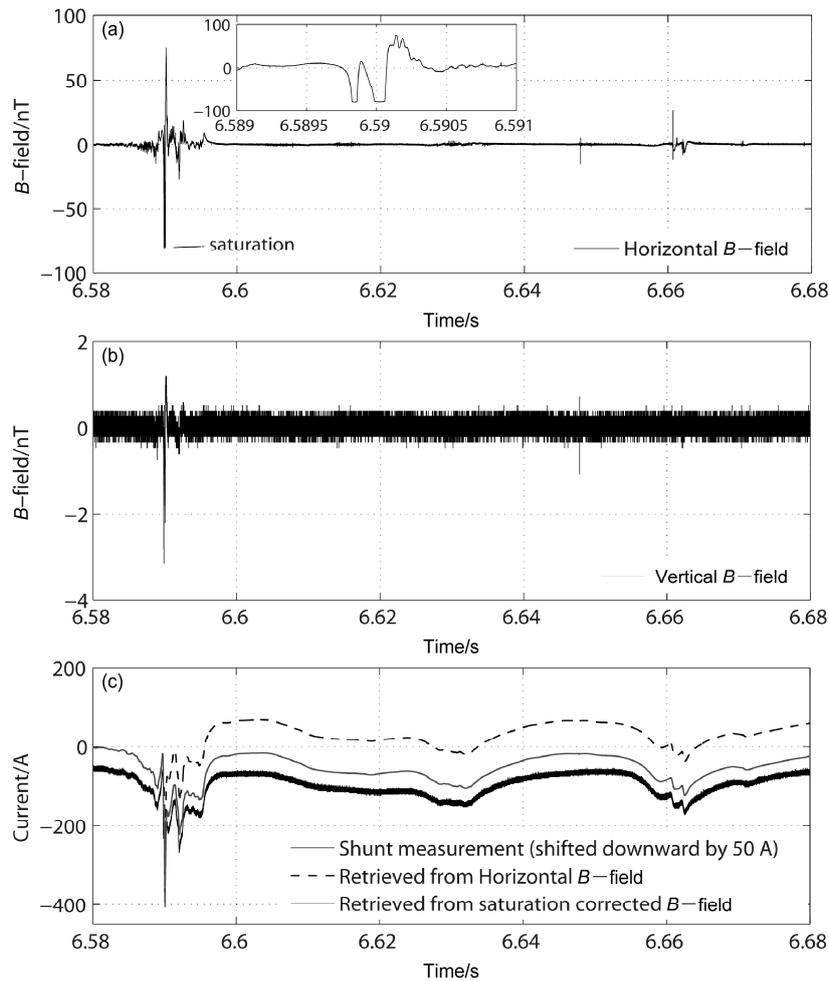


图9 2014年8月23日16:11的一次人工引雷测量结果:(a)78m处水平方向的磁场测量波形;(b)78米处垂直方向的磁场测量波形;(c)通过数值积分获得的初始连续电流波形及其同通道底部测量结果的比较

Fig. 9 Measurements of (a) horizontal magnetic field recorded at 78-m distance, (b) vertical magnetic field recorded at 78-m distance, and (c) initial continuous current waveform derived from the numerical integration and its comparison with the channel base current measurement for the triggering lightning at 1611 UTC of August 23, 2014

b和c为高速摄像机M310观测得到的光学图像,图10d和e为低光度成像仪UFO观测结果。从图10中可以发现,尽管5次人工引雷对应的闪电通道在上部分差异很大,在图10b中甚至出现了通道分叉,但是其距地400m以下部分都大致垂直于地面,使得利用数值积分方法反演电流波形时反演系数基本一致,也证明了当观测点与闪电通道距离固定时,该方法的反演系数是恒定的,通过标定不同距离处的反演系数,该方法可用于估算无直接电流测量的人工引雷初始连续电流或自然地闪中的连续电流。

5 总结和讨论

本文基于测量人工引雷闪电通道近距离处的

宽频段磁场,发展了一种初始连续电流波形的反演方法。传统的通道底部电流测量是通过采用同轴分流器或者Pearson线圈实现的,是人工引雷以及高建筑物引发闪电研究中的标准方法,而与传统电流测量相比,本文中反演方法所用的低频磁场天线制作和架设相对简单,成本较低,并且可以根据实验要求的不同调节磁场天线增益等参数,可操作性更强。更重要的是,通过该方法反演得到的初始连续电流结果信噪比很高,可以作为人工引雷实验闪电电流测量的辅助手段,并为获得空中引雷实验中初始连续电流的波形提供了一种实验手段。在诸如高建筑物引发闪电及自然闪电等没有闪电电流直接测量的情况下,通过该反演方法可以得到闪电连续

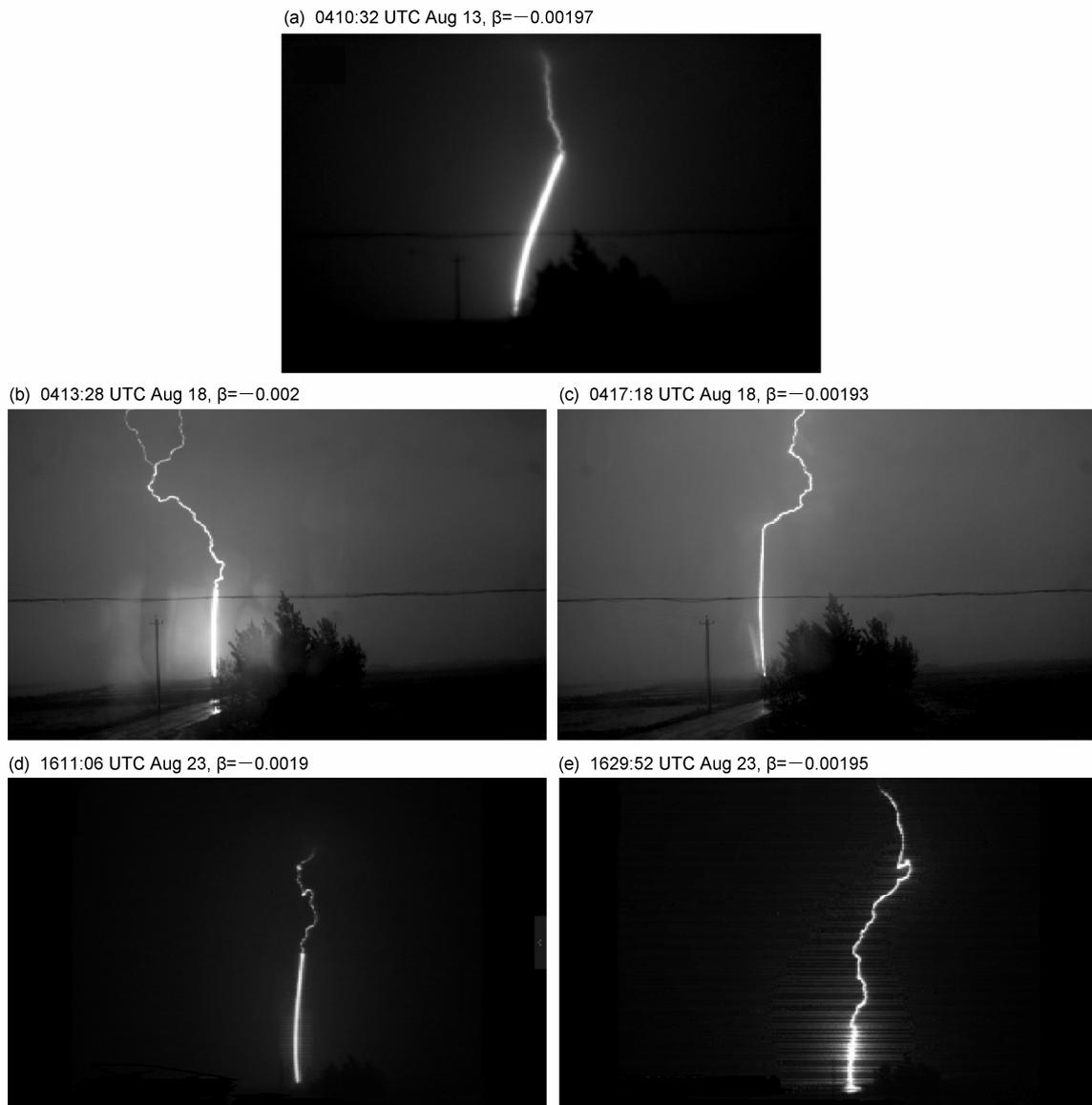


图 10 五次人工引雷实验光学观测结果及反演系数
Fig. 10 Optical observations of five rocket-triggering lightning flashes in 2014 and their retrieval coefficients

电流较为可靠的结果。

值得注意的是，随着观测距离的增加，对于特定时间尺度的电流而言，辐射场的贡献将越来越大，因此需要更加复杂的关系式来建立闪电电流同测量磁场之间的关系；此外初始连续电流期间云内放电过程（如 K 过程等）辐射的磁场相对贡献也会随着观测距离增大而增加，该方法中通道电流产生的磁场占主导地位的适用条件也将不再满足。由此可见，观测距离增加会导致磁场测量结果的构成发生明显变化，而且需要考虑更多的复杂放电过程。考虑到 78 m 处的磁场数据反演结果已在多次人工

引雷实验中得到验证，目前只能保守估计本方法适用于 100 m 范围内的空中引雷初始连续电流以及自然地闪回击中连续电流的波形反演。在今后的工作中，需要进一步通过设计专门的实验来确定该方法的适用范围，并且探索适用范围更加普遍的反演新方法。

参考文献 (References)

Biagi C J, Jordan D M, Uman M A, et al. 2009. High-speed video observations of rocket-and-wire initiated lightning [J]. Geophys. Res. Lett., 36 (15): L15801, doi:10.1029/2009GL038525.

- 樊艳峰, 陆高鹏, 张鸿波, 等. 2017. 人工触发闪电实验中初始电流脉冲辐射磁场的观测与模拟 [J]. 高电压技术, 43 (3): 987–993. Fan Yanfeng, Lu Gaopeng, Zhang Hongbo, et al. 2017. Observations and simulations of the magnetic fields radiated by initial current pulses in rocket-triggered lightning [J]. High Voltage Engineering (in Chinese), 43 (3): 987–993, doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.201703000.
- Heidler F. 1985. Traveling current source model for LEMP calculation [C]// Proceedings of the 6th International Zurich Symposium Technical Exhibition. Zurich: Electromagnetic Compatibility, 157–162.
- Hubert P, Laroche P, Eybert-Berard A, et al. 1984. Triggered lightning in New Mexico [J]. J. Geophys. Res., 89 (D2): 2511–2521, doi:10.1029/JD089iD02p02511.
- Jiang R B, Qie X S, Wang C X, et al. 2013. Propagating features of upward positive leaders in the initial stage of rocket-triggered lightning [J]. Atmospheric Research, 129–130 (8): 90–96, doi: 10.1016/j.atmosres.2012.09.005.
- 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.
- Lu G P, Zhang H B, Jiang R B, et al. 2016. Characterization of initial current pulses in negative rocket-triggered lightning with sensitive magnetic sensor [J]. Radio Sci., 51 (9): 1432–1444, doi:10.1002/2016RS005945.
- Rakov V A, Uman M A, Rambo K J, et al. 1998. New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama [J]. J. Geophys. Res., 1031 (D12): 14117–14130, doi:10.1029/97JD02149.
- Qie X S, Jiang R B, Yang J. 2014. Characteristics of current pulses in rocket-triggered lightning [J]. Atmospheric Research, 135–136: 322–329, doi:10.1016/j.atmosres.2012.11.012.
- Qie X S, Zhang Q L, Zhou Y J, et al. 2007. Artificially triggered lightning and its characteristic discharge parameters in two severe thunderstorms [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (8): 1241–1250, doi:10.1007/s11430-007-0064-2.
- Qie X S, Zhao Y, Zhang Q L, et al. 2009. Characteristics of triggered lightning during Shandong artificial triggering lightning experiment (SHATLE) [J]. Atmospheric Research, 91 (2–4): 310–315, doi:10.1016/j.atmosres.2008.08.007.
- Qie X S, Jiang R B, Wang C X, et al. 2011. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash [J]. J. Geophys. Res., 116 (D10): D10102, doi:10.1029/2010JD015331.
- 鄢秀书, 杨静, 蒋如斌, 等. 2012. 山东人工引发雷电综合观测实验及回击电流特征 [J]. 大气科学, 36 (1): 77–88. Qie Xiushu, Yang Jing, Jiang Rubin, et al. 2012. Shandong artificially triggering lightning experiment and current characterization of return stroke [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (1): 77–88, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.07.
- Rakov V A, Crawford D E, Kodali V, et al. 2003. Cutoff and reestablishment of current in rocket-triggered lightning [J]. J. Geophys. Res., 108 (D23): 4747, doi:10.1029/2003JD003694.
- Sun Z L, Qie X S, Jiang R B, et al. 2014. Characteristics of a rocket-triggered lightning flash with large stroke number and the associated leader propagation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 119 (23):13,388–13,399, doi:10.1002/2014JD022100.
- Thottappillil R, Rakov V A. 2007. Review of three equivalent approaches for computing electromagnetic fields from an extending lightning discharge [J]. Journal of Lightning Research, 1: 90–110.
- Uman M A, McLain D K, Krider E P. 1975. The electromagnetic radiation from a finite antenna [J]. American Journal of Physics, 43 (1): 33–38, doi:10.1119/1.10027.
- Wang D, Rakov V A, Uman M A, et al. 1999. Characterization of the initial stage of negative rocket-triggered lightning [J]. J. Geophys. Res., 104 (D4): 4213–4222, doi:10.1029/1998JD200087.
- Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. 2010. Characteristics of channel base currents and close magnetic fields in triggered flashes in SHATLE [J]. J. Geophys. Res., 115 (D23): D23102, doi:10.1029/2010JD014420.
- 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]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 143–144: 88–101, doi:10.1016/j.jastp.2016.03.009.