



·高功率微波技术·

地闪通道底部回击速度的频变特性分析*

厉焱翀, 罗小军, 张 琪, 邱 实, 石立华

(陆军工程大学 电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室, 南京 210007)

摘 要: 回击通道的光学观测对于研究回击发展过程和物理机制、完善工程回击模型都具有重要的意义。采用雷电发展过程高速光学观测系统(LiPOS)测量了人工引雷中距离通道底部 21 m 至 309 m 的一组通道发光波形, 基于系统辨识的输出误差(OE)模型建立了回击向上传播过程光辐射脉冲间的传递函数, 获得了 1 kHz~1 MHz 频段内群速度和相速度曲线。时域分析表明, 通道辐射光脉冲波形前沿上升时间由靠近底部的 1.1 μ s 变化为 309 m 高度处的 1.84 μ s, 色散特性是其变化的重要原因。频域分析表明, OE 模型能够有效抑制测量噪声的影响、获得清晰的分析曲线, 100 kHz 以下低频段内群速度呈显著的非单调变化, 500 kHz 以上区域群速度稳定在 58% 光速左右。将分析结果与相关文献的研究进行了对比和讨论。研究结果对于定量评价回击电流传播色散特性具有重要参考价值。

关键词: 雷电; 回击速度; 色散; 光学观测; 传递函数

中图分类号: O441.6

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220185

Analysis on variation of return stroke velocity with frequency at the channel bottom of cloud to ground lightning

Li Yichong, Luo Xiaojun, Zhang Qi, Qiu Shi, Shi Lihua

(National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-optical Engineering,
Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Observation of the return stroke channel is a key approach in understanding return stroke's developing process and mechanism, and therefore to improve the engineering model. A lightning progression feature photic observation system (LiPOS) is used to observe the bottom luminosity from 21 m to 309 m in the artificially triggered lightning. The output-error (OE) model in system identification is applied to establish the upward propagation transfer function between different luminosity pulses. The curves of phase velocity and group velocity between 1 kHz to 1 MHz are obtained. Time-domain analysis shows that the risetime of the leading edge changes from 1.1 μ s at the bottom to 1.84 μ s at 309 m height, and the dispersion in velocity is the key factor to induce this effect. The frequency-domain analysis shows that the OE model can suppress the measurement noise and give a clear frequency distribution curve. Below 100 kHz, the group velocity curve has a range with strong non-monotonic variation, and the curve becomes flat and reaches 58% of light velocity above 500 kHz. The analyzed results are finally compared to the research work in the reference literature and some discussions are presented. The results may find further applications in evaluating dispersions in return strokes quantitatively.

Key words: lightning, return stroke velocity, dispersion, optical observation, transfer function

地闪回击电流的工程模型是简化分析回击过程、预测评估回击电流产生的辐射场的重要依据^[1]。现有的工程模型有多种^[2-3], 无论哪一种, 回击电流在通道内的传播速度都是一个关键参数。目前工程模型中的回击速度取值均不随频率变化^[1]。王宇等人分析了雷电定位系统反演地闪回击电流准确度受回击速度取值的影响^[4], 结果表明对于负地闪后续回击可能存在一定程度高估, 可能与回击速度取值比实际偏小有关。由于回击电流空间发展无法

* 收稿日期: 2022-06-03; 修订日期: 2022-07-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(51977219)
联系方式: 厉焱翀, 474170282@qq.com。
通信作者: 石立华, shilih@tom.com。

直接测量,回击速度主要通过光学观测方法获得,具体包括高速条纹相机、光电阵列和高速摄像等^[5-7]。虽然有学者认为光学观测的速度与电流速度之间存在不同,但受电流不同高度发展直接测量手段制约,目前普遍仍以光学速度为主要依据^[8-9]。除此之外,也有通过观测电磁场反演电流速度^[10],通过甚高频辐射直接观测通道底部回击速度的方法^[11]。

光辐射信号的监测和分析一直是雷电物理研究的重要手段。Idone 等人采用高速条纹摄影技术对 63 次回击进行了观测,统计得出回击的平均速度为 1.1×10^8 m/s^[5]。Wang 等人研制了基于光电二极管阵列的雷电连接过程观测系统(LAPOS),采用该系统对美国佛罗里达国际雷电研究试验中心(ICLRT)人工引雷获取的 14 次回击过程进行了观测,统计得到通道底部 60 m 以下的回击速度介于 $(0.4 \sim 2.5) \times 10^8$ m/s 之间^[12]。袁萍教授团队采用无狭缝光栅摄谱仪,记录了地闪回击过程的光谱,结合等离子体理论和电动力学模型计算了闪电回击速度,结果表明回击速度在 $(1.2 \sim 2.3) \times 10^8$ m/s 的范围内^[13]。李鹏等人利用硅光电二极管探测器,对广东省从化地区和北京昌平地区的自然闪电光辐射信号进行了观测,并将统计结果与 FORTE 卫星上的硅光电二极管载荷的探测结果进行了对比^[14]。石立华教授团队基于高速摄像和甚高频定位系统实现对人工引雷回击过程三维发展速度进行了分析,发现 1 km 以下的回击速度在 $(0.7 \sim 1.9) \times 10^8$ m/s 内呈现非单调变化^[11]。贾晟等人进一步依据该变化对 1.2 km 处的辐射电场进行了分析并与实测电场进行了对比,探讨了电场波形与回击速度非单调变化之间的关系^[15]。目前对回击速度的评估基本在时域开展,Olsen 等人曾对比了按照 10%、20%、90%、100% 峰值点对应的时刻以及前沿斜率与先导对应波头部分电平交点来确定到达时间的差异,得到的回击速度各不相同^[6]。这一现象的根本原因是回击在通道内传播具有色散特性,而在频域研究和应用回击速度的研究非常之少。目前可检索到的文献只有 Carvalho 等人 2017 年发表的一篇频域分析文章^[16]。Carvalho 等人采用 11 组雪崩光电二极管测量了人工引雷点地面至 115 m 高度的 11 个高度上的通道光强变化,结果表明,在通道亮度时间曲线峰值随高度降低的同时,脉冲上升时间逐渐增大;进一步采用 FFT 方法分析了在四个不同通道高度处测得的人工触发闪电回击过程的色散关系,得到了 50~300 kHz 频段的相速度和群速度^[16]。

由于测量信号受到噪声的干扰,Carvalho 等人在绘制频谱响应曲线时采用了 5 点滑动平均去噪,在求取相速度和群速度时采用了多项式拟合的算法。本文在上述工作的基础上,对在实验室开展的人工引雷试验获取的通道底部亮度时程曲线进行了分析。测量数据为回击通道底部 309 m 以下间隔 96 m 高度 4 个位置的光强。与文献 [16] 不同,使用了时域建模的方法,有效抑制了噪声的影响,获得了 1 kHz~1 MHz 范围内的相速度和群速度,发现了 100 kHz 以下低频段的显著非单调变化特征。

1 试验设置与测量结果

在人工引雷试验中,配合基电流测量、电磁场观测,设置了一套自行研发的雷电发展过程高速光学观测系统(LiPOS)^[17],见图 1。该系统共有 4 个光学测量通道,每个通道由光敏二极管进行光强检测,响应波长范围为 560~930 nm,峰值响应波长约 800 nm,设置在距离人工引雷点 1.2 km 处。根据观测仰角、距离和镜头焦距计算得到的视场内观测最大高度为 309 m,每个二极管检测高度范围为 96 m。光电测量系统的信号带宽 125 MHz,数据采集系统采样频率为 50 MHz,AD 分辨率 12 位,4 通道同步触发。图 2 给出了一组 2019 年夏季在苏北地区的引雷试验光学观测波形。其中,S5 至 S8 通道分别代表自底部向上的四个观测通道,对应的观测高度分别为 21, 117, 213 和 309 m。此次引雷触发了 6 次回击,S5 通道对六次回击(RS1~RS6)的分段测量记录见图 2(a),为显示清晰,绘图时对每个回击的起始时间进行了调整;4 个通道对第 5 次回击的观测记录见图 2(b),各通道波形幅度进行了归一化。从图中可见,回击由底部向上发展依次被 S5~S8 通道观测记录,波形起始时间逐渐延迟,前沿逐渐变缓。

2 数据处理方法和结果

2.1 参数化的传递函数模型

为了处理得到 S5~S8 传播过程中的相速度和群速度,需要求解各通道间的传递函数。这里采用系统辨识的

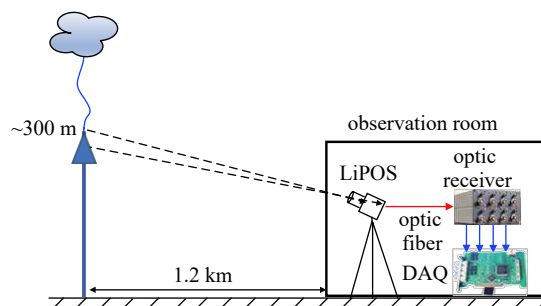


Fig. 1 Components of LiPOS and experimental setup

图 1 LiPOS 系统组成及实验设置

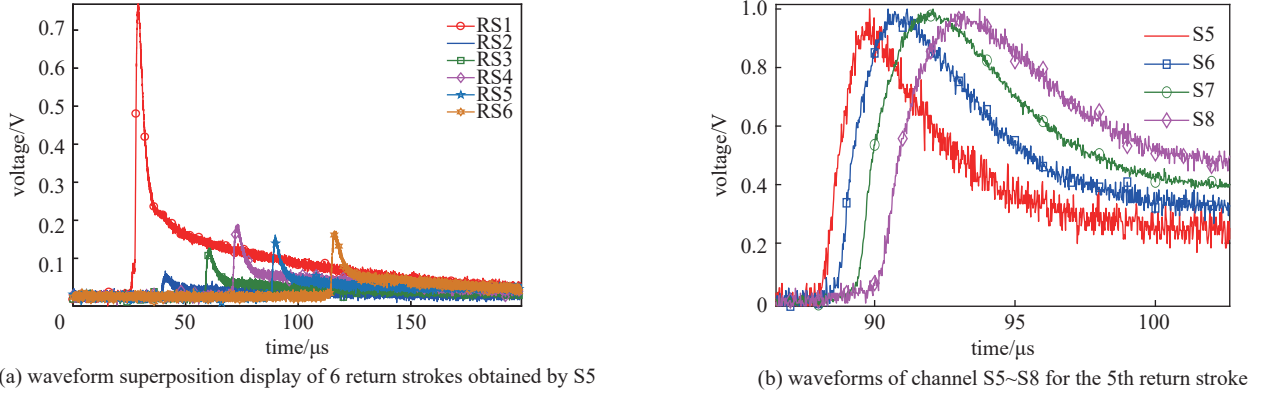


Fig. 2 Optically observed records in the channel bottom of an artificially triggered lightning

图2 人工引雷通道底部光学观测记录

方法建立输出误差模型(OE模型)^[18]。假设系统输入为 $x(n)$ 、输出为 $y(n)$,其 z 变换为 $X(z)$ 和 $Y(z)$,则OE模型的传递函数具有以下形式

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^n b_k X(z) z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^n a_k Y(z) z^{-k}} + W(z) \quad (1)$$

其中, $W(z)$ 代表白噪声(输出误差)的影响, a_k 和 b_k 为待定系数。这一模型可采用多种参数估计法,通过求解得到

$$y(n) = \sum_{k=0}^n b_k x(n-k) + \sum_{k=1}^n a_k y(n-k) \quad (2)$$

其中, $k=0,1, \dots, N-1$,代表总长度为 N 的时间序列采样点。建立该模型后,可转换得到系统的频率响应特性为

$$H(e^{j\omega}) = \frac{\sum_{k=0}^n b_k e^{-jk\omega}}{1 + \sum_{k=1}^n a_k e^{-jk\omega}} \quad (3)$$

其中, ω 为数字频率,可由 $\omega=2\pi f/f_s$ 得到对应的频率响应函数 $H(f)$ 。与直接采用FFT计算传递函数的方法相比,这一方法能够有效抑制测量噪声造成的高频段传递函数不准问题,且通过参数化模型可提供任意频率上的响应,克服了FFT低频段频率分辨率不足的问题。

2.2 相速度与群速度的求取

在求取 $H(f)$ 的基础上,可得到系统的相位延迟为

$$\tau_p(f) = -\frac{\angle H(f)}{2\pi f} \quad (4)$$

其中, $\angle H(f)$ 是频率响应函数相位,单位是rad。群延迟为

$$\tau_g(f) = -\frac{1}{2\pi} \left[\frac{d}{df} \angle H(f) \right] \quad (5)$$

进而可得到相速度和群速度

$$v_p(f) = \frac{\Delta h}{\tau_p(f)} \quad (6)$$

$$v_g(f) = \frac{\Delta h}{\tau_g(f)} \quad (7)$$

其中, Δh 为光电二极管探测视野对应的分段高度,取为96 m。

2.3 OE 模型的建模结果

采用 OE 模型, 对图 2 中第 5 次回击 RS5 的一组光学观测波形进行了建模。以最低高度处 S5 的波形为输入, 分别以其他 3 个高度处的观测波形 S6~S8 为输出, 建立了回击向上传播过程的 OE 模型。在建模中, 通过求解(2)式的最优解, 模型预测输出波形与实际观测波形一致。图 3 为该组模型由 S5 预测 S8 的效果, 与实际 S8 波形比较可见, 建模效果良好。虽然输入 S5 和输出 S8 均含有严重的噪声, 但在 OE 建模后的预测输出中, 噪声得到很好的抑制。比较由 FFT 法和 OE 法获得的 S5~S8 群延迟, 可见 OE 法结果平滑稳定, 而 FFT 法受噪声的影响, 比较混乱, 难以进一步处理获得准确的相速度和群速度。分别对 S5~S6、S5~S7、S5~S8 对应 OE 的相位按照式(6)和式(7)进行了求取, 得到各自对应的相速度和群速度, 结果如图 4 所示。

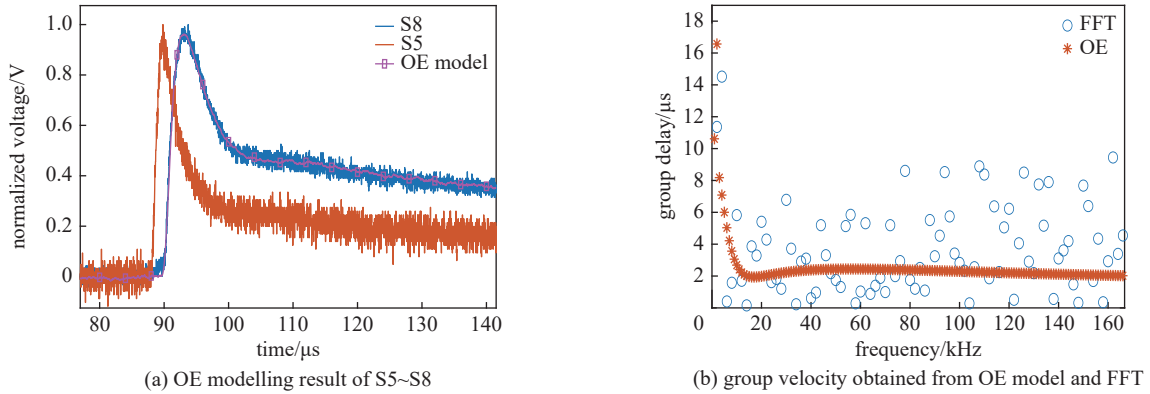


Fig. 3 Result of OE model for S5~S8

图 3 S5~S8 的 OE 建模结果

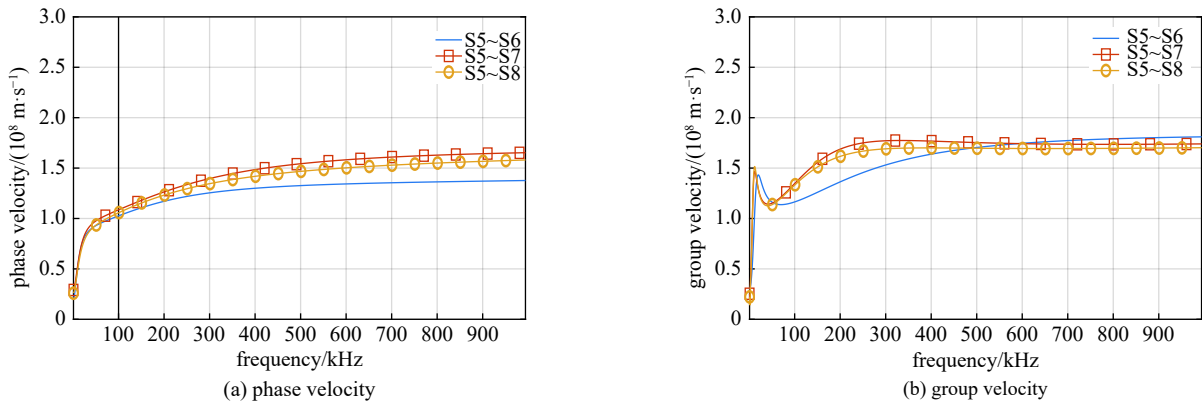


Fig. 4 Phase and group velocity obtained from OE model

图 4 OE 建模获得的相速度和群速度

3 进一步讨论

3.1 关于色散的时域和频域特征

从图 4 的群速度曲线来看, S5~S6、S5~S7、S5~S8 三段长度上的传递函数所体现的群速度具有较好的一致性, 在低频部分均呈现明显非单调变化的色散特征; 在高频段群速度稳定在 1.75×10^8 m/s 左右。这一色散特性在时域上的表现则是波形前沿的逐渐变缓。表 1 是对 S5~S8 四个通道 10%~90% 上升时间的统计, 可见随高度的增加, 前沿上升时间由 $1.1 \mu\text{s}$ 增加到 $1.84 \mu\text{s}$ 。一般来说, 前沿的变缓是色散和高频成分衰减的综合效应。图 5 给出了 4 个通道的波形频谱密度曲线, 可见其频谱分布没有特别大的变化, 主要频率成分分布在 100 kHz 以下, 而这一频段是图 4 群速度曲线非单调变化的主要区域。因此, 群速度随频率的变化是时

表 1 S5~S8 的前沿上升时间

Table 1 Risetime of the waveforms of channel S5~S8

channel	height/m	rise time/ μs
S5	20.64	1.10
S6	116.64	1.32
S7	212.64	1.56
S8	308.64	1.84

域波形前沿变缓的一个非常重要原因。

通道光强测量的一个直接应用就是表征回击发展的速度和强度。以往研究表明,人工引雷获得的回击电流波形与光辐射脉冲在前沿上升时间上呈正相关^[9,18],而这一结论也可作为利用光辐射脉冲的波形前沿变化评估电流传播色散的依据。在现有回击的工程模型中,回击速度尚没有体现对频率的依赖关系。

表 2 根据图 2 统计了不同长度的传播路径对应的时域速度,分别按照 10% 时刻、50% 时刻和前沿斜截距^[5]给出了各自的对应值。可见这些到达时刻定义所决定的时域速度不尽相同,这是由群速度的色散曲线所决定的。表 2 的时域速度提示在通道底部稍高的部分,速度可能更慢,但频域色散曲线没有这一特征的明显体现。这一现象进一步证明了波形变缓会影响对传播速度的判定,但传播速度有可能从频域看仍然是稳定的,只不过不同频率成分到达时刻随着传播距离的增加逐渐拉开,形成了时域速度的视在变化。

表 2 不同传播高度对应的时域平均速度

Table 2 Risetime of the waveforms of channel S5~S8

indicators	time domain delay/ μs			time domain speed/ $(10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$		
	10%	50%	oblique intercept	10%	50%	oblique intercept
S5~S6	0.52	0.52	0.50	1.85	1.85	1.92
S5~S7	1.24	1.24	1.10	1.55	1.55	1.75
S5~S8	1.98	2.18	1.86	1.45	1.32	1.55

3.2 对相关文献结果的再分析和对比讨论

Carvalho 等人曾对美国 ICLRT 于 2014 年观测的一组人工引雷通道底部光强测量结果进行了频谱分析,观测高度 4~115 m,共分析了四个测量通道的信号,获得了 50~300 kHz 的群速度和相速度曲线^[16]。我们对其在文献 [16] 提供的一组光电二极管的测量波形进行了数字化,采用本文方法进行了处理。为了消除数字化引入的波形局部抖动,采用如下雷电流拟合常用的 Heidler 模型进行了平滑,

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2\right]} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + I_{02} \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_3}}\right) \quad (8)$$

由此获得的原文献 D6(高度 42.5 m)和 D11(115 m)的波形见图 6。以 D6 为系统输入、D11 为系统输出,采用 OE 建模并求取了群延迟和群速度。首先在文献 [16] 所给出的 50~300 kHz 频段与其进行了比较,结果见图 7。二者总体一致。需要指出的是,原文献测量结果受到 FFT 分析分辨率和噪声的限制,没有给出更低频和更高频的结果,同时其速度曲线是在噪声上下界之间做的平滑拟合,如图 7(b)各条曲线的标注所示。

由于本文采用了模型法求取两个通道间的传递函数,根据式(3)可计算任意频率的响应,避免了噪声的影响,同时克服了 FFT 分析频率分辨率的不足,因此可以有效拓展分析频率范围。图 8 给出了 1 kHz~1 MHz 频段的群速度和相速度曲线,图中同时给出了直接频谱分析的结果。采用了 Heidler 拟合并延拓至 100 μs ,提升了 FFT 频谱分辨率、延拓了低频分析下限,数字化重采样频率为 50 MHz。FFT 与 OE 建模分析结果完全吻合,证明 OE 建模方法的结果是准确可靠的。从图中可见,在 50 kHz 以下低频段,文献 [16] 波形采用本文方法再处理结果与我们人工引雷试验测量数据分析结果类似,群速度同样呈显著的非单调变化,并存在一个局部峰值,约为 60% 光速;在本文

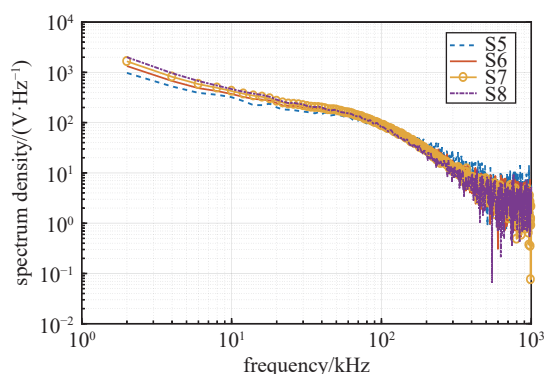


Fig. 5 Spectrum density of channel S5~S8

图 5 S5~S8 的频谱密度分布

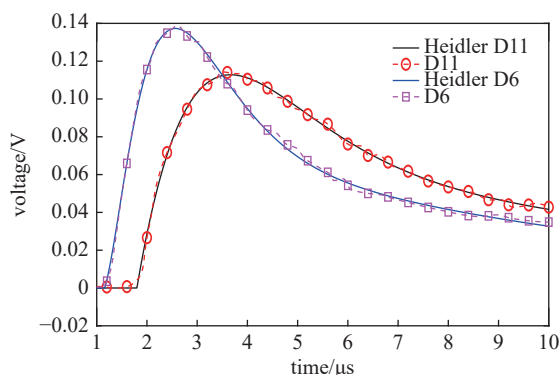


Fig. 6 Waveforms in Ref. [16] by Heidler function fitting

图 6 采用 Heidler 函数对文献 [16] 波形的拟合结果

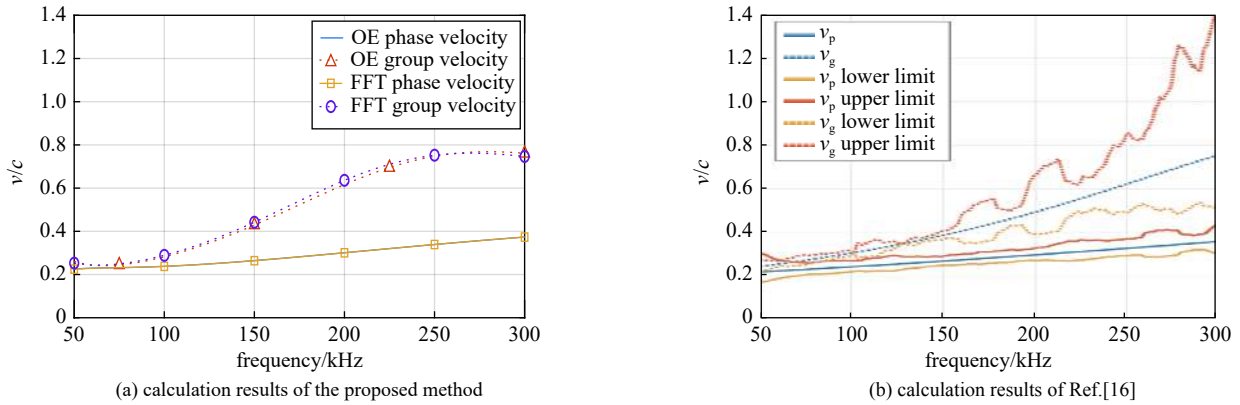


Fig. 7 Comparison of the results obtained by OE modeling with the curves given in Ref. [16]

图7 OE方法处理结果与文献[16]结果的比较

图4的结果中,这一局部峰值约为50%光速。在分析频段内,群速度和相速度在600 kHz后趋于稳定,保持在40%光速;本文图4结果中,这一稳定值出现在500 kHz以后,约在58%光速。需要指出的是,由于图5分析表明光强信号的能量频谱分布主要在100 kHz以下,所以低频段群速度的非单调变化对回击速度的影响是显著的。

4 结论

本文采用基于系统辨识OE模型的建模方法分析了2019年苏北地区人工引雷中通道底部21~309 m的一组通道发光测量波形,测量信号由560~930 nm波长范围的光电二极管阵列获得,四个通道各自监测视野高度间隔96 m。时域分析表明,通道辐射光脉冲波形前沿上升时间由靠近底部的

1.1 μs 变化为309 m高度处的1.84 μs ,色散特性是其变化的重要原因。频域分析获得了1 kHz~1 MHz频段内回击发展的群速度和相速度曲线。结果表明,OE模型作为一种描述系统传递函数的参数化模型,能够有效抑制测量噪声的影响。与国外同类研究结果对比表明,本文分析方法对已有的50~300 kHz频段结果进行了有效拓展,重叠频段内结果一致性较好。拓展的低频段内发现了群速度显著的非单调变化,多个通道分析结果和对文献数据的建模再分析表明,这一非单调变化的特征均存在。通道底部光脉冲的色散特性应当对应于回击电流传输中的明显色散。后续将在非单调变化色散曲线产生原因及色散效应对回击模型的影响方面开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] Rakov V A. 雷电参数的工程应用[M]. 高毅, 杨少杰, 译. 北京: 气象出版社, 2019. (Rakov V A. Lightning parameters for engineering applications[M]. Gao Yi, Yang Shaojie, trans. Beijing: China Meteorological Press, 2019)
- [2] Rakov V A, Uman M A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1998, 40(4): 403-426.
- [3] 田明宏, 盛松林, 魏光辉, 等. 雷电回击参数对回击电磁场计算的影响研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(6): 599-603. (Tian Minghong, Sheng Songlin, Wei Guanghui, et al. Effects of several parameters on electromagnetic field of lightning return stroke[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(6): 599-603)
- [4] 王宇, 谷山强, 孟刚, 等. 雷电定位系统反演地闪回击电流的准确度受回击速度取值的影响[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1617-1624. (Wang Yu, Gu Shanqiang, Meng Gang, et al. Effect of lightning return stroke speed on accuracy of inverted return stroke peak current using lightning location system[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1617-1624)
- [5] Idone V P, Orville R E. Lightning return stroke velocities in the thunderstorm research international program (TRIP)[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C7): 4903-4916.
- [6] Olsen III R C, Jordan D M, Rakov V A, et al. Observed one-dimensional return stroke propagation speeds in the bottom 170 m of a rocket-triggered lightning channel[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L16107.
- [7] Mach D M, Rust W D. A photoelectric technique for measuring lightning-channel propagation velocities from a mobile laboratory[J]. *Journal of Atmospheric*

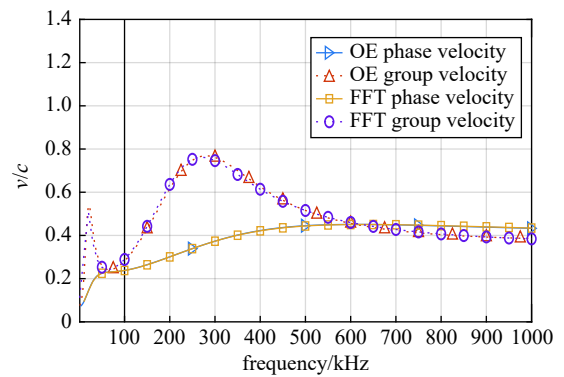


Fig. 8 Group and phase velocities calculated from the waveforms given in Fig. 6

图8 由图6波形计算得到的群速度和相速度曲线

- and Oceanic Technology, 1989, 6(3): 440-445.
- [8] Liang C, Carlson B, Lehtinen N, et al. Differing current and optical return stroke speeds in lightning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(7): 2561-2567.
- [9] Wang Daohong, Takagi N, Watanabe T, et al. A comparison of channel-base currents and optical signals for rocket-triggered lightning strokes[J]. *Atmospheric Research*, 2005, 76(1/4): 412-422.
- [10] Yang Gun, Yu Zhanqing, Zhang Yijun, et al. Evaluation of lightning current and return stroke velocity using measured far electric field above a horizontally stratified ground[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(6): 1940-1948.
- [11] Li Yun, Qiu Shi, Shi Lihua, et al. Observed variation of three-dimensional return stroke speeds along the channel in rocket-triggered lightning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(22): 12569-12575.
- [12] Wang D, Takagi N, Gamera W R, et al. Initiation processes of return strokes in rocket-triggered lightning[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(17): 9880-9888.
- [13] 刘国荣, 安婷婷, 万瑞斌, 等. 依据光谱研究闪电回击通道核心的特征参数[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(10): 3269-3275. (Liu Guorong, An Tingting, Wan Ruibin, et al. Study on the characteristic parameters of lightning return stroke channel core based on spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(10): 3269-3275)
- [14] 李鹏, 郑毅, 韩超, 等. 基于光电二极管探测器的闪电光辐射信号观测[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(10): 2625-2629. (Li Peng, Zheng Yi, Han Chao, et al. Observation of lightning optical signals with photodiode detector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(10): 2625-2629)
- [15] 贾晟, 李云, 孙征, 等. 雷电回击速度非单调变化对电场波形的影响分析[J]. *电波科学学报*, 2020, 35(2): 234-241. (Jia Sheng, Li Yun, Sun Zheng, et al. Impact of non-monotonic change of return stroke velocity on electric field waveform[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(2): 234-241)
- [16] Carvalho F L, Uman M A, Jordan D M, et al. Frequency domain analysis of triggered lightning return stroke luminosity velocity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(4): 2334-2350.
- [17] Huang Liyang, Zhang Qi, Qiu Shi, et al. Development of a high-speed optical system for lightning flash observation[J]. *Measurement*, 2019, 131: 85-91.
- [18] Jiang Zhidong, Zhou Bihua, Qiu Shi, et al. Time-domain calibration of the LEMP sensor and compensation for measured lightning electric field waveforms[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(5): 1172-1177.