

# 一次人工触发闪电回击过程的光辐射色散特性分析\*

罗小军 石立华<sup>†</sup> 张琪 邱实 李云 刘毅诚 段艳涛

(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)

(2022 年 3 月 17 日收到; 2022 年 4 月 26 日收到修改稿)

采用改进的连续小波变换对一组人工触发闪电的回击过程光学辐射信号进行了色散特性分析, 并与经典  $R-L-C$  传输线模型的计算结果进行了对比. 结果表明, 回击过程光学辐射信号不同频率分量的到达时间随频率的增加具有非线性变化; 在不同频率分量的到达时间曲线上, 低频段均出现了一个转折频率, 并且转折频率的大小通常在 10—25 kHz 之间. 该转折频率的存在为评估回击通道特性和电导率提供了一类新的参数化依据, 据此估算了此次触发闪电六次回击过程的通道电导率, 平均变化范围为  $(0.59—0.96) \times 10^4 \text{ S/m}$ , 总体平均值约为  $0.77 \times 10^4 \text{ S/m}$ , 与经典评估结果相似.

**关键词:** 时频分析, 回击, 色散, 通道电导率**PACS:** 92.60.Pw, 92.60.Ta, 52.80.Mg**DOI:** 10.7498/aps.71.20220479

## 1 引言

闪电是一种超强的放电现象, 并且伴随有大电流、高温、极强的电磁辐射和剧烈的发光. 其中, 回击在时间和空间上均呈现出较大的尺度<sup>[1,2]</sup>, 是闪电中能量最强的放电过程之一, 对其进行研究一直是雷电物理和雷电防护领域的热点<sup>[3,4]</sup>. 而回击速度作为回击最重要的特征参数之一, 不仅影响回击电流沿闪电通道的时空变化, 还影响着回击电流与其辐射场之间的关系<sup>[5,6]</sup>. 理解回击速度的变化特征, 不仅可以帮助分析电流的演化机制, 还可以发展更加详细的闪电回击模型<sup>[7–9]</sup>.

为了实现对回击速度的观测, 具有不同时空分辨率的光学观测方法一直都在不断发展, 主要有条纹相机<sup>[10–12]</sup>、雷电连接过程观测系统 (lightning attachment process observation system, LAPOS)<sup>[13–15]</sup>、

高速摄像机<sup>[16,17]</sup>等. 其中回击电流在通道内的传播时间主要通过两种方法进行估算, 一是不同通道高度处第一个高于阈值的光信号的到达时间差<sup>[11]</sup>, 二是不同通道光信号波形前沿的平均斜率曲线与参考电平线的时间交点差<sup>[18]</sup>, 这两种方法均是在时域中进行的. 然而, Jordan 和 Uman<sup>[19]</sup>的研究结果指出随着回击通道高度的增加, 初始光强峰值呈指数衰减, 并且初始光信号的前沿增加了 1—2  $\mu\text{s}$ ; Carvalho 等<sup>[20]</sup>对两次触发闪电回击过程进行分析, 也指出光信号的上升时间从地面处的大约 0.2  $\mu\text{s}$  上升至 115 m 处的 1.3  $\mu\text{s}$ ; Wang 等<sup>[21]</sup>通过对自然闪电继后回击过程的分析, 同样观察到光信号的上升时间和峰值衰减与通道高度正相关, 这说明回击电流在通道中的传播具有色散特性. 事实上, 对于地闪而言, 要么是由下行梯级先导引发并形成首次回击, 要么是由直窜先导引发并形成继后回击<sup>[21]</sup>, 其通道均是一个完全电离的热等离子体, 回击电流在

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51977219)、中国博士后科学基金 (批准号: 2019M663978)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20200584) 和国防基础科学研究计划 (批准号: JCKYS2021LD1) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [lihuashi@aliyun.com](mailto:lihuashi@aliyun.com)

通道内的传播理应呈现色散特性. 为此, Kawasaki 等<sup>[22]</sup>引入了回击“尖端速度”和“群速度”, 并通过两组光信号的相位差估算了平均群速度, 结果表明群速度几乎是使用传统时域方法计算的尖端速度的一半. Carvalho 等<sup>[23]</sup>进一步扩展了 Kawasaki 等的工作并采用傅里叶变换 (Fourier transform, FT) 在频域内分析了触发闪电回击过程的“群速度”和“相速度”. 通过对光信号的 50—300 kHz 频率分量进行分析, 他们发现高频分量的群速度和相速度总是比低频分量的群速度和相速度快. Rakov<sup>[24]</sup>则通过传输线理论计算了不同过程的相速度和群速度, 并且发现在确定的频率范围内, 随着频率的增加, 相速度和群速度均呈现增大的趋势, 但是衰减距离呈现减小的趋势, 这一计算结果表明高频分量相比低频分量衰减更快, 且理论证明了回击过程与经典的传输电流波相似, 表明回击电流在通道中的传播具有色散特性.

然而, 目前有关回击电流色散特性的讨论远未完善, 原因在于: 一是缺乏足够的观测数据, 地闪的随机性以及人工引雷的高成本使得对回击电流色散特性的分析仍处于资料累积阶段; 二是缺乏高效的分析方法, 前人采用的 FT 方法的准确性受观测信号信噪比的影响较为显著, 低频分辨率差高频噪声严重, 此外, Rakov 在文献<sup>[24]</sup>中提出的理论模型尚缺乏直接的试验验证.

本文采用改进的连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 分析回击过程的光辐射色散特性, 在抑制噪声影响的同时, 获得了高分辨率的时间和频率信息; 分析结果从试验角度证实了传输线理论分析回击电流色散特性的合理性.

## 2 观测装置及数据

本文分析的数据为 2019 年 7 月 30 日一次人工触发闪电试验<sup>[25]</sup>中记录的一组回击光辐射信号. 图 1 为试验现场综合观测平台示意图, 其中站点 A 为中心观测站, 包括引雷火箭发射系统和电磁场测量系统等, 站点 B 是辅助同步观测站, 与站点 A 直线距离为 1.2 km. 回击光辐射信号由自研的雷电发展过程高速光学观测系统 (lightning leader progression feature photic observation system, LiPOS)<sup>[26]</sup>捕捉, 系统的实测响应带宽为 200 MHz, 对应响应时间为 1.75 ns, 满足对微秒级前沿光辐

射信号的测量需要. 试验中, LiPOS 安装在站点 B, 相邻两个通道实际观测的回击通道高度差约为 96 m, 观测的总高度大约为 300 m.

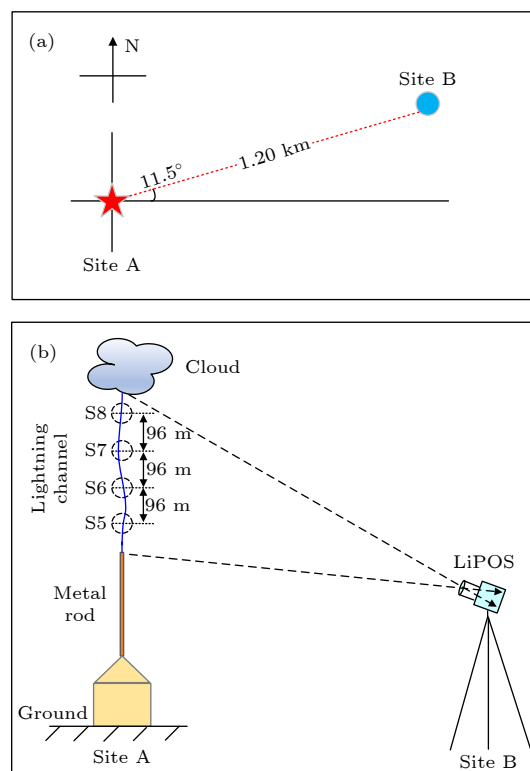


图 1 触发闪电试验布局 (a) 综合观测平台; (b) LiPOS 观测示意图

Fig. 1. Layout of the trigger site: (a) Schematic diagram of the comprehensive observation platform; (b) observation diagram of the LiPOS.

本次触发闪电共包含六次回击, 图 2(a) 为 S5 通道记录的六次回击光辐射信号. 各次回击的光强峰值均不相同, 表明六次回击过程强弱均不相同, 并且六次回击过程均是 S5 通道首先触发, 然后回击继续向上传播, 依次经过 S6, S7, S8 通道. 上述 S5—S8 通道对应的观测高度分别为 20.64, 116.64, 212.64 和 308.64 m.

以第三次回击 (the third return stroke, RS3) 为例, LiPOS 系统同时也观测到了回击之前极弱的先导信号, 如图 2(b) 虚线圆圈所示. 先导发展过程与回击过程恰好相反, S8 通道首先触发 (触发时间约 51.36  $\mu$ s), 紧接着先导向下继续传播, 随后经过 S7 通道 (触发时间约 70.24  $\mu$ s)、再依次经过 S6 和 S5 通道, 表明在 LiPOS 观测区域内, 观测到了先导下行过程.

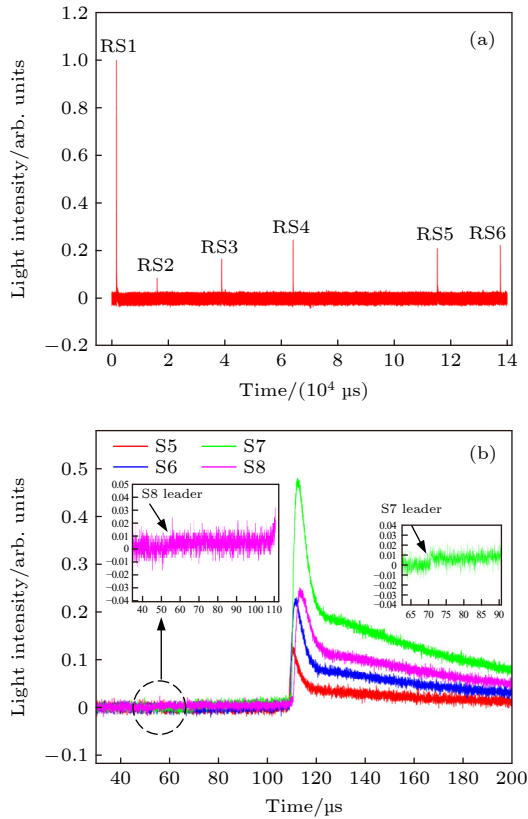


图 2 触发闪电回击光信号 (a) S5 通道记录的六次回击归一化波形; (b) 第三次回击光信号波形, 插图 S8 和 S7 通道记录的先导波形

Fig. 2. Optical signals of the return stroke: (a) Normalized light intensity of all six return strokes recorded by channel S5; (b) optical signals of RS3. The expanded leader observed by channel S8 and S7 is shown in the inset.

### 3 时频分析

为了同时获得回击光辐射信号的频率及其到达时间, 采用 CWT 方法对光信号进行分析, 原理如下:

$$W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt = \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle, \quad (1)$$

式中,  $a$  是尺度因子 ( $a > 0$ );  $b$  是时间因子;  $\overline{\psi_{a,b}(t)}$  是小波分析函数  $\psi_{a,b}(t)$  的复共轭。

传统 CWT 方法以时频分布图的形式描述分析结果, 分辨率不足, 本文对传统的 CWT 方法进行了改进, 以便来获取更为精确的小波中心频率及其到达时间. 首先, 确定待分析的一系列中心频率  $f_i$ ; 然后, 计算对应频率的尺度因子  $a_i$ , 并进行 CWT 运算; 选择复 Morlet 小波作为分析小波, 则 CWT 的模值相当于该中心频率波包的包络, 延迟时间体现了  $f_i \pm \Delta f$  的群速度; 最后, 提取 CWT 计算结

果模值的局部极大值并将其刻画在时频平面上, 从而得到不同频率分量的时频曲线. 图 3 为 RS3 中 S8 通道分别采用传统 CWT 方法和改进的 CWT 方法计算的时频分析结果. 与传统的 CWT 算法相比, 改进后的 CWT 极大地提高了时频分布图的时频分辨率.

通过对 S8 通道实测信号的能量频域分布进行分析 (图 3(a)), 可知当频率大于 400 kHz 时, 信号的能量占比很小, 不足 1%, 表明实测信号的频率分量主要集中在 400 kHz 以下, 因此在进行时频分析时主要对能量占比较高的频率分量 ( $f \leq 400$  kHz) 进行计算. 从图 3 可以看出, 改进的 CWT 方法可以同时清晰获得回击光辐射信号的频率和不同频率分量的到达时间; 在同一幅时频图上可以同时区分出极弱的先导过程与强回击过程, 如图 3(d) 所示. 图 3 的结果还表明, 其中先导过程在 150—250 kHz 频率变化范围内, 到达时间相差了大约 15  $\mu$ s, 而回击过程在 0—400 kHz 频率范围内, 到达时间仅相差了大约 10  $\mu$ s, 表明先导过程比回击过程的色散更加明显; 回击光辐射信号不同频率分量的到达时间呈现非单调变化.

## 4 验证及讨论

### 4.1 方法验证

根据 Rakov<sup>[24]</sup> 的假设, 雷电通道可近似为等效  $R$ - $L$ - $C$  传输线. 利用这一理论模型, 首先对 CWT 时频分析方法的分析能力进行了验证. 传输线理论中传播常数  $\gamma$  为

$$\gamma = \sqrt{j\omega C(R + j\omega L)}, \quad (2)$$

式中,  $f$  为频率, 单位是 Hz;  $\omega = 2\pi f$  为角频率;  $R$  为单位长度的串联电阻 (与电导率成反比,  $\sigma = 1/(\pi r^2 R)$ , 其中  $r$  为回击通道的半径);  $L$  为串联电感;  $C$  为并联电容 (在回击通道有限观测范围内,  $R, L, C$  均近似为常数<sup>[24]</sup>). 相位常数  $\beta$  定义为

$$\beta = \text{Im}(\gamma) = \omega \sqrt{LC} \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{R}{\omega L} \right)^2} + 1 \right]}, \quad (3)$$

则群速度  $v_g = d\omega/d\beta$ <sup>[6,24]</sup>. 假定传输线模型中单位长度电阻  $R$  为 3.5  $\Omega/\text{m}$ , 单位长度电感  $L$  和电容分别为 2.3  $\mu\text{H}/\text{m}$  和 7 pF/m<sup>[24]</sup>, 计算得到电流波传播的群速度如图 4(a) 所示. 图 4(b) 为以该群速度传播 300 m 后的群延迟.

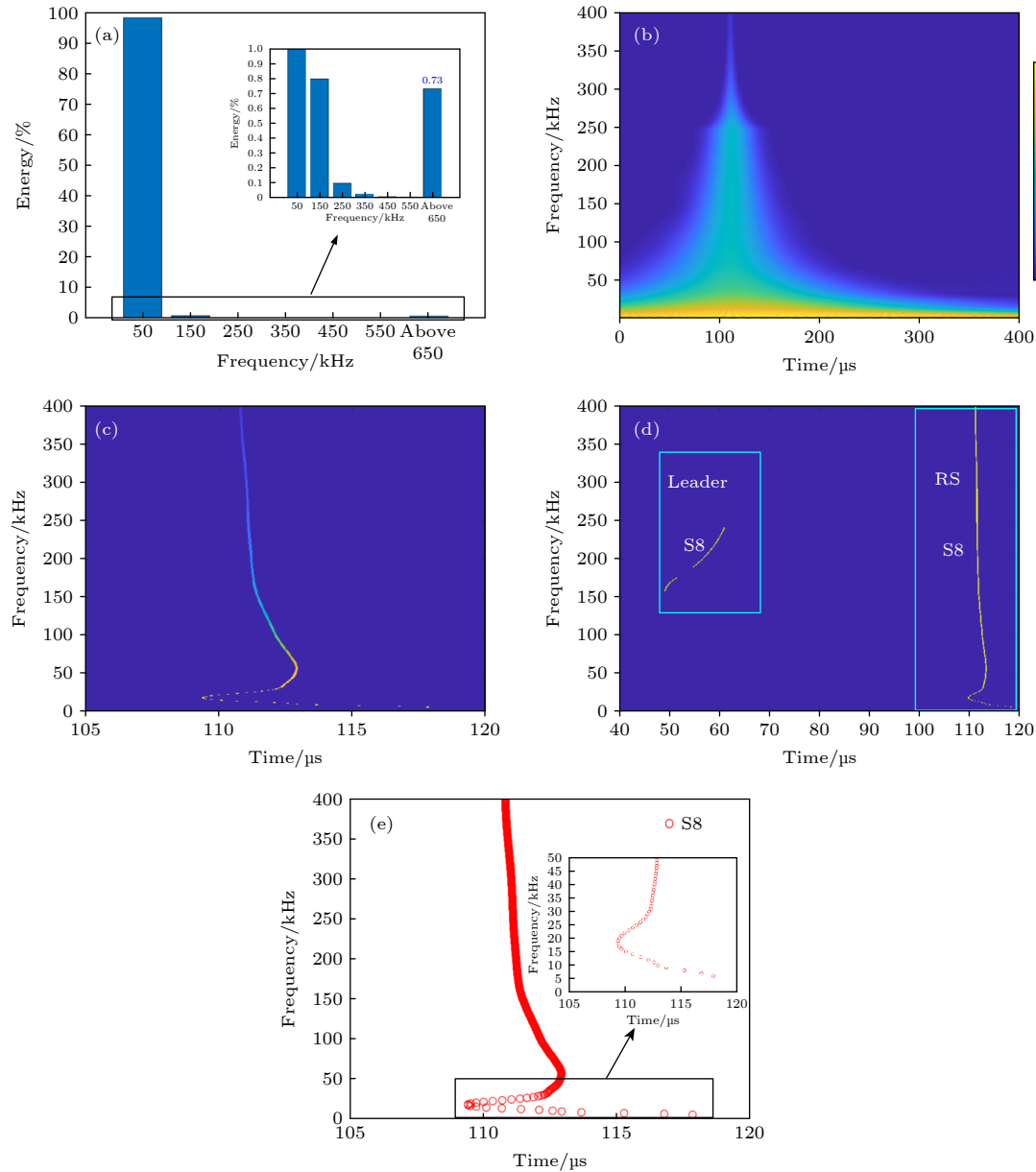


图 3 第三次回击中 S8 通道分析结果 (a) S8 通道不同频率分量百分比; (b) 传统 CWT 时频分析结果; (c) 改进 CWT 时频分析结果; (d) 回击和先导光辐射信号的归一化时频图; (e) 回击光辐射信号不同频率分量到达时间散点图, 插图为 50 kHz 以下的散点图  
 Fig. 3. The results of channel S8 of RS3: (a) Energy percentage of the frequency components of channel S8; (b) time-frequency analysis results calculated by traditional CWT method; (c) time-frequency analysis results calculated by improved CWT method; (d) normalized time-frequency graph of the return stroke and the leader optical radiation signal; (e) scatter plot of arrival time of different frequency components of the return stroke optical radiation signal. The inset is the expanded scatter plot below 50 kHz.

从图 4(a) 可以看出, 在初始阶段 (141.25 kHz 以下), 随着频率的增加, 群速度逐渐增大至  $0.9c$  ( $c$  为真空光速), 而随着频率继续增加至 10 MHz, 群速度呈现下降趋势并稳定至  $0.83c$ , 对应的群延迟则随着频率的增加而呈现先减小后增大的特点, 在 141.25 kHz 处达到最小 (此时对应群速度最快). 这一结果与图 3 中时频分析的结果相似, 表明修正的 CWT 方法计算的结果是合理的.

为了进一步验证时频分析结果的准确性, 本文

假定了一个如图 5(a) 所示的初始脉冲 (红色曲线), 并分析了其以图 4(a) 计算的群速度传播 300 m 之后的波形 (图 5(a) 蓝色曲线) 及其时频特性, 结果如图 5(b) 所示.

从图 5(b) 可以看出, 初始脉冲的到达时间 (红色圆圈) 是一致的, 表明设定的初始脉冲没有色散现象, 但传播 300 m 之后, 出现了色散现象 (蓝色圆圈所示), 50 kHz 以下的频率分量的到达时间明显大于 50 kHz 以上的频率分量的到达时间. 而且



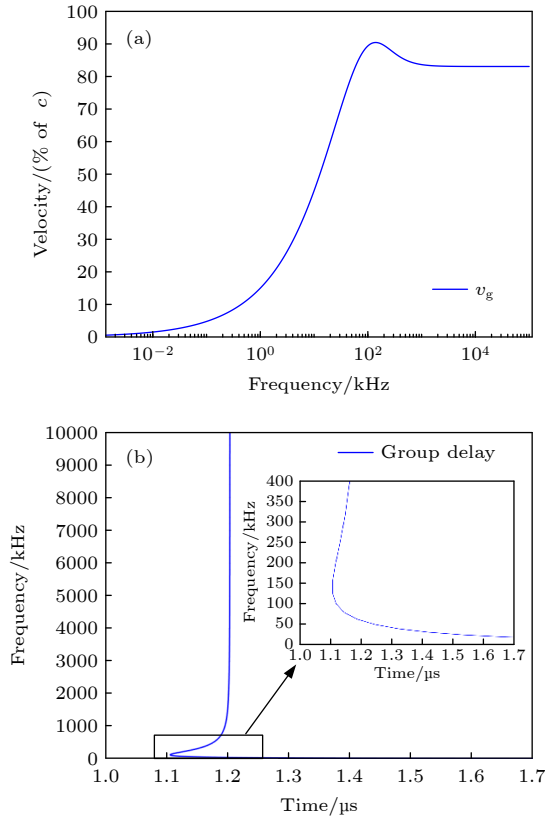


图 4 (a) 群速度随频率的变化关系 ( $c$  为真空光速); (b) 群延迟

Fig. 4. (a) Relationship between group velocity and frequency ( $c$  is the speed of light in vacuum); (b) group delay.

通过时频分析方法计算的不同频率的到达时间与通过传输线理论仿真的群时延完全一致, 如图 5(b) 中蓝色圆圈与粉红色曲线所示, 进一步表明本文提出的修正 CWT 方法是可靠的。

## 4.2 讨论

从图 3(a) 可以看出, 第三次回击中 S8 通道光信号的能量主要集中在 400 kHz 以下, 并且 400 kHz 以上的信号成分的能量占比不超过 1%. 因此, 针对回击通道光辐射信号 400 kHz 以下的频率分量进行分析. 图 3(e) 为回击光辐射信号低于 400 kHz 频率分量到达时间散点图, 在 50—400 kHz 频率范围内, 随着频率逐渐降低, 对应的到达时间在逐渐增大, 说明不同频率分量的传播速度在逐渐减小, 这一结果与 Carvalho 等<sup>[23]</sup>报道的在 50—300 kHz 频率范围内的结果相似. 然而, 在 18—50 kHz 的频率范围内, 随着频率的逐渐减小, 对应的到达时间也逐渐减小; 在 18 kHz 频率范围以下, 随着频率的逐渐减小, 对应的到达时间又再次呈现逐渐增

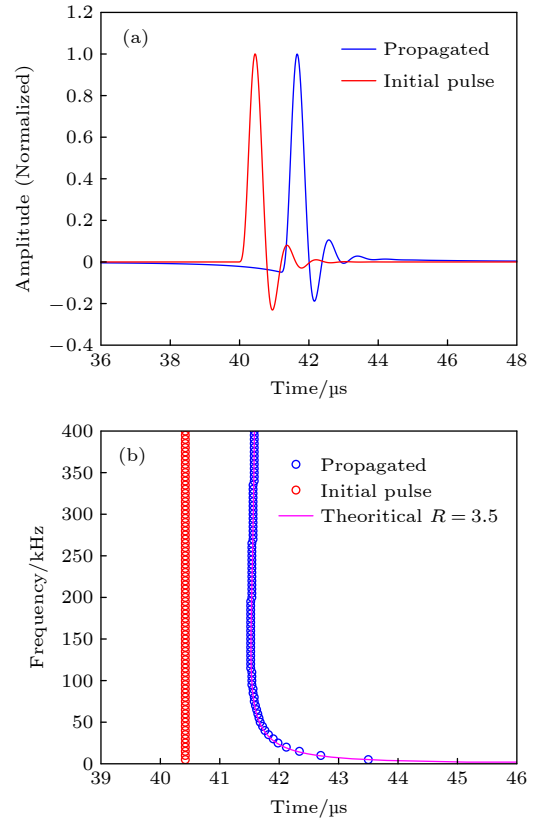


图 5 (a) 初始脉冲及传播后的脉冲; (b) 时频分析方法和传输线模型计算结果

Fig. 5. (a) Initial impulse and propagated pulse; (b) results calculated by the time-frequency method and the TL model.

大的趋势. 简言之, 就是不同频率分量的到达时间曲线在大约 18 kHz 处出现了一个“转折点”. 通过对六次回击过程的分析发现, 六次回击光辐射信号的时频曲线均具有类似的转折点, 说明不同频率分量的到达时间随频率的变化是非单调的, 这不仅进一步证明了回击过程存在色散特性, 还指出了回击发展速度也理应是单调变化的, 与本实验室根据甚高频辐射探测报道的回击速度<sup>[27]</sup>非单调变化的结论一致.

基于图 4 的分析结果, 通过改变单位长度电阻  $R$  值的大小, 利用传输线理论模型进一步计算了不同  $R$  值条件下对应的群时延, 结果如图 6 所示. 可以看出, 随着单位长度电阻  $R$  值的逐渐减小 (电导率增大), 转折点频率也逐渐降低, 并且转折趋势也越来越明显, 这表明通过直接可测的转折频率可定量间接体现回击通道的电导率. 表 1 为通过传输线模型计算的不同单位长度电阻  $R$ 、电导率  $\sigma$  和转折频率的对应关系, 计算中回击通道半径假定为约 1 cm<sup>[28–31]</sup>.

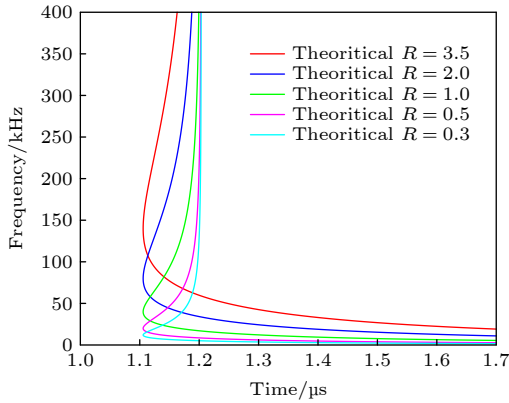
图 6 不同  $R$  值对应的群时延曲线Fig. 6. Group delay curves corresponding to different  $R$  values.

表 1 传输线模型计算的通道特征参数  
Table 1. Channel characteristic parameters calculated by the TL model.

序号	转折频率/kHz	$R/(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	$\sigma/(10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$
1	141.25	3.5	0.09
2	79.43	2.0	0.16
3	39.81	1.0	0.32
4	19.95	0.5	0.64
5	12.02	0.3	1.06

由表 1 的计算结果对转折频率与单位长度电阻的关系进行拟合, 发现两者近似线性关系 ( $f = 40.28R - 0.2692$ , 式中  $f$  为转折频率, 单位为 kHz), 则电导率  $\sigma$  与转折频率关系为

$$\sigma = \frac{40.28}{\pi r^2(f + 0.2692)}. \quad (4)$$

结合时频分析方法和电导率与转折频率的关系, 对六次实测数据分析的结果如表 2 所列, 其中时频分析计算的转折频率的变化范围在 10—25 kHz 之间.

从表 2 可以看出, 实测数据计算的电导率量级

均为  $10^4 \text{ S/m}$ , 与 Rakov<sup>[24]</sup> 报道的结果一致. 在同一次回击过程中, 不同高度处的电导率并不完全一样, 但变化范围总体相对较小, 其中 RS1, RS2 和 RS6 的通道电导率在观测高度 (约 300 m) 内变化均在 4% 以内, RS4 和 RS5 的通道电导率变化不超过 7.3%, RS3 的通道电导率变化范围最大, 在 15.5%—16.7% 之间. 本次触发闪电过程六次回击的通道电导率平均值变化范围为  $0.59 \times 10^4$ — $0.96 \times 10^4 \text{ S/m}$ , 总体平均值为  $0.77 \times 10^4 \text{ S/m}$ .

以往, 王雪娟等<sup>[32]</sup> 分析了无狭缝光谱仪和高速摄像机联合拍摄的闪电光谱资料, 指出在 3 km 高度变化范围内, 闪电通道电导率变化范围不超过 5%. 赵金翠等<sup>[33]</sup> 也基于无狭缝光谱仪拍摄的闪电光谱资料对闪电通道的电导率进行了计算, 结果表明回击通道电导率总体相对稳定, 变化幅度不超过 12%. 这两组结果均表明同组闪电回击通道的电导率幅值变化不大, 与本文提出的时频分析方法的计算结果相似, 也说明由 LiPOS 系统及其观测结果时频分析曲线得到的转折频率估算触发闪电回击通道电导率是可行且合理的.

## 5 结 论

本文利用连续小波变换对一次人工触发闪电试验中六次回击的光辐射信号进行了时频分析. 结果表明, 随着频率的增加, 光辐射信号不同频率分量的到达时间呈现出非单调变化的特征, 并在低频段出现了转折点. 传输线理论模型和时频分析的结果表明, 通道单位长度电阻越小 (电导率越大), 转折点频率越低, 转折趋势越明显, 且单位长度电阻与转折频率具有近似线性关系, 据此估算的触发

表 2 实测数据的通道特征参数  
Table 2. Channel characteristics of the observed results.

回击	S5通道		S6通道		S7通道		S8通道		电导率平均值/ $10^4$
	转折频率/kHz	$\sigma/(10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$	转折频率/kHz	$\sigma/(10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$	转折频率/kHz	$\sigma/(10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$	转折频率/kHz	$\sigma/(10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$	
RS1	17.5	0.72	17	0.74	16.7	0.76	16.5	0.76	0.75
RS2	19	0.67	18.7	0.68	18.6	0.68	19.1	0.66	0.67
RS3	14	0.90	13	0.97	16	0.79	18	0.70	0.84
RS4	12.2	1.03	13.6	0.92	13.7	0.92	13	0.97	0.96
RS5	21	0.60	20	0.63	22.5	0.56	23	0.55	0.59
RS6	16.5	0.76	16	0.79	15.7	0.80	15.5	0.81	0.79
电导率平均值	—	—	—	—	—	—	—	—	0.77

闪电六次回击通道的电导率总体均值为  $0.77 \times 10^4 \text{ S/m}$ .

## 参考文献

- [1] Liang C, Carlson B, Lehtinen N, Cohen M, Marshall R A, Inan U 2014 *Geophys. Res. Lett.* **41** 2561
- [2] Cai S, Chen M, Du Y, Qin Z 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 8686
- [3] Tang G Y, Sun Z L, Jiang R B, Li F Q, Liu M Y, Liu K, Qie X S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 189201 (in Chinese) [唐国瑛, 孙竹玲, 蒋如斌, 李丰全, 刘明远, 刘昆, 郗秀书 2020 物理学报 **69** 189201]
- [4] Li S L, Qiu S, Shi L H, Li Y, Duan Y T 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 165202 (in Chinese) [李书磊, 邱实, 石立华, 李云, 段艳涛 2019 物理学报 **68** 165202]
- [5] Heidler F H 2019 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **61** 644
- [6] Hoole P R P, Hoole S R H 1988 *IEEE Trans. Magn.* **24** 3165
- [7] Wang D H, Takagi N, Gamera W R, Uman M A, Hill J D, Jordan D M 2013 *J. Geophys. Res. Atmos.* **118** 9880
- [8] Liu L, Yang S Y, Ni G Z, Huang J 2014 *IEEE Trans. Magn.* **50** 149
- [9] Ratnamahilan P, Hoole P R P 1993 *IEEE Trans. Magn.* **29** 1839
- [10] Schonland B F J, Malan D J, Collens H 1935 *Proc. R. Soc. London* **152** 595
- [11] Schonland B F J 1956 *Hand. Phys.* **22** 576
- [12] Idone V P, Orville R E 1982 *J. Geophys. Res.* **87** 4903
- [13] Wang D H, Takagi N, Watanabe T, Rakov V A, Uman M A 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 14369
- [14] Wang D H, Takagi N, Uman M A, Jordan D M 2016 *J. Geophys. Res. Atmos.* **121** 14612
- [15] Olsen R C, Rakov V A, Jordan D M, Jerauld J, Uman M A, Rambo K J 2006 *J. Geophys. Res.* **111** D13202
- [16] Saba M M F, Schulz W, Warner T A, Campos L Z S, Schumann C, Krider E P, Cummins K L, Orville R E 2010 *J. Geophys. Res.* **115** D24201
- [17] Tran M D, Rakov V A 2016 *Sci. Rep.* **6** 39521
- [18] Olsen R C, Jordan D M, Rakov V A, Uman M A, Grimes N 2004 *Geophys. Res. Lett.* **31** L16107
- [19] Jordan D M, Uman M A 1983 *J. Geophys. Res.* **88** 6555
- [20] Carvalho F L, Uman M A, Jordan D M, Ngim T 2015 *J. Geophys. Res. Atmos.* **120** 10645
- [21] Wang D H, Takagi N, Liu X, Watanabe T, Chihara A 2004 *Geophys. Res. Lett.* **31** L02111
- [22] Kawasaki Z, Nakano M, Takeuti T 1987 *Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn.* **107** 47
- [23] Carvalho F L, Uman M A, Jordan D M, Moore R C 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 2334
- [24] Rakov V A 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 1879
- [25] Li Y C, Zhang Q, Luo X J, Si Q, Ran Y Z, Wang J B, Fu S C, Sun Z, Shi L H 2021 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **63** 1146
- [26] Huang L Y, Zhang Q, Wang J B, Duan Y T, Chen H L, Shi L H, Gao C 2020 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **62** 324
- [27] Li Y, Qiu S, Shi L H, Wang T, Zhang Q, Lei Q, Sun Z 2018 *Geophys. Res. Lett.* **45** 569
- [28] Taylor A R 1965 *J. Geophys. Res.* **70** 5693
- [29] Oetzel G N 1968 *J. Geophys. Res.* **73** 1889
- [30] An T T, Yuan P, Chen R R, Zhang N, Wan R B, Zhang M, Liu G R 2021 *J. Geophys. Res. Atmos.* **126** 105851
- [31] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Zhang T L, Xue S M, Zhao J C, Xu H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 109201 (in Chinese) [王雪娟, 袁萍, 岑建勇, 张廷龙, 薛思敏, 赵金翠, 许鹤 2013 物理学报 **62** 109201]
- [32] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Wang J, Zhang T L 2013 *Spectrosc. Spect. Anal.* **33** 3192 (in Chinese) [王雪娟, 袁萍, 岑建勇, 王杰, 张廷龙 2013 光谱学与光谱分析 **33** 3192]
- [33] Zhao J C, Yuan P, Cen J Y, Li Y J, Wang J 2015 *Spectrosc. Spect. Anal.* **35** 1474 (in Chinese) [赵金翠, 袁萍, 岑建勇, 李亚琨, 王杰 2015 光谱学与光谱分析 **35** 1474]

# Analysis of optical radiation dispersion characteristics of an artificially triggered lightning return stroke process<sup>\*</sup>

Luo Xiao-Jun   Shi Li-Hua<sup>†</sup>   Zhang Qi   Qiu Shi  
Li Yun   Liu Yi-Cheng   Duan Yan-Tao

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

( Received 17 March 2022; revised manuscript received 26 April 2022 )

## Abstract

In this paper, improved continuous wavelet transform is used to analyze the dispersion characteristics of a group of optical radiation signals of return stroke in an artificially triggered lightning, and the analysis results are compared with the results calculated by the classical  $R$ - $L$ - $C$  transmission line model. The analysis results show that the arrival time of different frequency components of the optical radiation of return stroke presents nonlinear variation with frequency. Moreover, a turning point always appears in the low frequency band on the arrival time curves of different frequency components, and the turning frequency is usually between 10 kHz and 25 kHz. The existence of this turning frequency provides a new kind of parameterization basis for evaluating the characteristic and conductivity of the return stroke channel. Based on this, the channel conductivities of the six return strokes of this triggered lightning are estimated. The average variation ranges from  $0.59 \times 10^4$  S/m to  $0.96 \times 10^4$  S/m, and the overall average value is about  $0.77 \times 10^4$  S/m, which are similar to the classical evaluation results.

**Keywords:** time-frequency analysis, return stroke, dispersion, channel conductivity

**PACS:** 92.60.Pw, 92.60.Ta, 52.80.Mg

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220479

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51977219), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2019M663978), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20200584), and the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. JCKYS2021LD1).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lihuashi@aliyun.com](mailto:lihuashi@aliyun.com)





## 一次人工触发闪电回击过程的光辐射色散特性分析

罗小军 石立华 张琪 邱实 李云 刘毅诚 段艳涛

## Analysis of optical radiation dispersion characteristics of an artificially triggered lightning return stroke process

Luo Xiao-Jun Shi Li-Hua Zhang Qi Qiu Shi Li Yun Liu Yi-Cheng Duan Yan-Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 179201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220479

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220479>

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

#### 依据不同波段光谱诊断闪电回击通道温度

Diagnosis of lightning return stroke channel temperature according to different band spectra

物理学报. 2022, 71(10): 109201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211673>

#### 太赫兹量子级联激光器频率梳的色散

Group velocity dispersion analysis of terahertz quantum cascade laser frequency comb

物理学报. 2019, 68(10): 109501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190217>

#### 太赫兹半导体激光光频梳研究进展

Research progress of terahertz semiconductor optical frequency combs

物理学报. 2020, 69(18): 189501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200399>

#### 六重准晶涡旋光光子晶体光纤特性

Transmission characteristics of vortex beams in a sixfold photonic quasi-crystal fiber

物理学报. 2019, 68(11): 114209 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190381>

#### 基于光场一阶关联的时域成像

Temporal imaging based on first-order field correlation

物理学报. 2019, 68(10): 104202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190184>

#### 基于嵌套三角形包层结构负曲率太赫兹光纤的研究

Research on negative curvature terahertz fiber based on nested triangle structure cladding

物理学报. 2020, 69(16): 167801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200457>