

李婵, 张阳, 吕伟涛, 等. 地闪不规则先导的多尺度熵特征. 应用气象学报, 2014, 25(3): 347-353.

地闪不规则先导的多尺度熵特征

李 婵¹⁾²⁾ 张 阳²⁾ 吕伟涛²⁾³⁾ 郑 栋²⁾ 谭涌波¹⁾³⁾*

¹⁾(南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

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

针对不规则脉冲簇难以判别问题, 将多尺度熵应用于不规则先导分析中, 探讨闪电信号不规则脉冲分析应用中多尺度熵关键参量的选择方法。在此基础上, 将不规则先导与直窜先导及梯级先导闪电信号的多尺度熵进行比较。统计分析表明: 不规则先导和直窜先导熵值随尺度先增加后趋于平稳, 但熵值有很大差异; 梯级先导熵值随尺度变化不明显, 整体呈增长趋势, 与不规则先导的熵值在大于 3 的尺度上也有所差异, 因此当尺度大于 3 时可将熵值大于 1.5 的先导归类为不规则先导, 熵值小于 1.5 的先导归类为梯级先导或直窜先导。不规则先导的特征熵平均值为 2.0~2.1, 最大值范围为 2.6~2.8, 最小值范围为 1.51~1.59。

关键词: 样本熵; 多尺度熵; 直窜先导; 梯级先导; 不规则先导

引 言

闪电是发生在大气中的一种瞬态大电流、高电压放电现象。一次完整的地闪包含了预击穿过程、梯级先导过程、连接过程、首次回击过程、连续电流过程、直窜(梯级)先导过程和继后回击过程^[1]。人们采用各种方法对这些物理过程进行探讨, 其中先导过程一直以来都是研究重点^[2-5]。1982 年 Weidman^[6]首次发现了一种与梯级先导及直窜(梯级)先导特征明显不同的特殊先导——不规则先导, 它们表现出不规则脉冲簇的形式, 这些脉冲发生在回击之前的梯级先导及直窜先导位置, 无论在脉冲结构、脉冲宽度还是脉冲间隔方面均有明显的不规则性, 且这些窄脉冲放电事件会产生很强的高频辐射。其后对于先导研究也证实了这类不规则先导的存在^[7-12]。目前研究发现, 50% 以上的继后回击前均存在不规则先导。作为一种重要的先导过程, 其研究不仅有助于丰富对先导过程的认识, 深化对继后

回击形成机理的理解, 同时, 对其强烈的高频辐射特性研究也在敏感电子设备的防护方面具有潜在的应用价值^[13]。

对于不规则先导的研究大多基于频域分析方法, 其中功率谱分析方法最为常用。但这种基于傅里叶变换的功率谱是一种对不规则信号的不完备描述。从信号处理角度来看, 由傅里叶变换得到的功率谱密度只是全局性描述, 不能用于表征信号的不规则程度, 更无法表征系统内在机制的复杂程度。到目前为止, 人们对于这种不规则性并没有一个确切定义, 在其不规则表征方面也没有相关探讨。

熵作为一种处理复杂信号的重要工具, 已广泛应用于信号复杂性的表征。为了分析短长度时间序列, Pincus^[14-15]提出的近似熵方法, 并应用于生理时间序列分析中。但在近似熵的定义中存在对自身数据段的比较, 依赖于数据长度, 会存在偏差。样本熵则是对近似熵的修改算法, 它不包含自身数据段的比较, 降低了近似熵的误差, 减少了对数据长度的依赖, 且具有较好的一致性。上述方法多基于某尺度,

2013-07-02 收到, 2013-12-03 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41205002, 41030960), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2012Y006), 科技部科研院所技术开发专项(2011EG137226)

* 通信作者, email: ybtan@ustc.edu

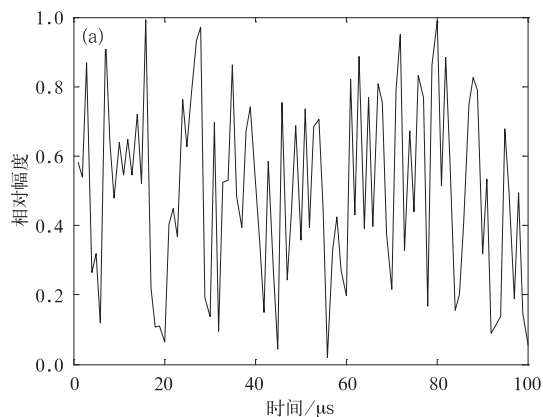
而时间序列的复杂度与时间尺度联系密切,因此上述熵的分析方法并不能完全表征时间序列的复杂度。近年来,Costa等^[16-17]提出了多尺度熵方法,它基于样本熵已被应用于生理时间序列及噪声信号分析^[18-19]。在多尺度上,若样本熵值在尺度上单调递增,则说明该时间序列的自相似性较大,复杂度较大;相反,若样本熵值在尺度上单调递减,则说明该序列在尺度上的自相似性比较低,复杂度小。多尺度熵算法既有样本熵统计量维持相对一致性特点,又克服了单尺度熵算法无法系统表征时间序列信号复杂度的缺点,并在电子器件噪声、医学信号、地球物理复杂信号等多种信号分析过程中得到应用。

本文将多尺度熵方法应用于不规则先导电场变化信号分析,给出了一种多尺度熵计算方法,并通过实例说明多尺度熵在表征复杂信号方面的能力,来区分不规则先导与直窜先导及梯级先导的不同。

1 闪电信号的获取

本研究用数据为2012年5—9月在广东闪电综合观测试验(GCOELD)获得的闪电放电过程电场快变化信号。

利用一套光电磁集成探测平台,对广州从化的闪电活动进行综合观测。该平台所使用的电场快变化传感器带宽为200 Hz~2 MHz,输出电压范围为±10 V,通过一块多通道PCI采集卡(NI-5105)进行采集,通过快电场变化信号触发来实现多通道同步记录,其中采样率为10 M/s,采用窗口触发的方式,触发阈值为±1 V,采样时间为1 s,预触发位置为20%,能够保障一次闪电放电过程的完整记录。



2 信号的多尺度熵分析

2.1 算法

由于多尺度熵是基于样本熵的计算方法,因此先得到样本熵,然后分别计算不同尺度因子下的样本熵,即可获得多尺度熵。

取一离散时间序列 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N\}$,共有 N 个点,将该时间序列进行粗-断点变换,得到新的时间序列:

$$y_i = 1/\tau \sum_{i=(i-1)\tau+1}^{i\tau} x_i, 1 \leq i \leq N/\tau. \quad (1)$$

其中, τ 是尺度因子,新时间序列的长度 $L = \text{int}(N/\tau)$,当 $\tau=1$ 时,新时间序列等于原始时间序列。

当该时间序列在尺度 τ 下的 N 有限值时,可在理论上得到样本熵

$$E_{SP}(m, r, \tau) = -\ln[C_\tau^{m+1}(r)/C_\tau^m(r)], \quad (2)$$

则可同时得到多尺度熵的定义: $E_{MSP} = \{E_{SP}(m, r, \tau) = \ln[C_\tau^{m+1}(r)/C_\tau^m(r)]\}$ 。一般取 $m=2, r=0.1 \sim 0.2 D_s, D_s$ 为原始数据的标准差^[20]。

本文选取了一组随机时间信号和一组规则正弦信号(图1)来检验所实现的多尺度熵方法。随机信号和规则正弦信号的长度 $N=4000$,尺度 $\tau=15$,维数 $m=2$,阈值 $r=0.15 \times D_s, D_s$ 是计算得到的时间序列的标准差。分别对两组信号进行多尺度熵分析,结果如图2所示。由图2可以看出,不规则随机信号的熵在每个尺度上都要大于规则正弦信号的熵,这与熵能表现信号复杂程度的结论相符,且不规则随机信号的熵值在尺度上单调递减,与文献[20]计算给出的结果变化趋势一致。

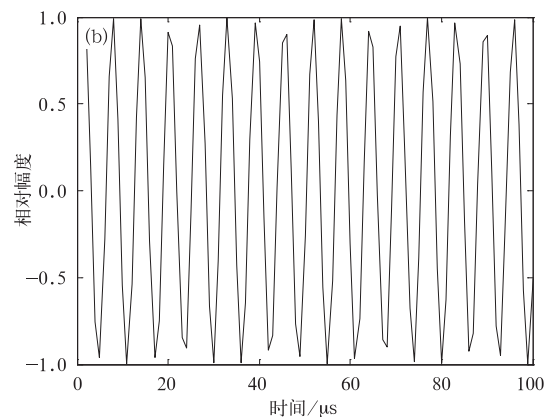


图1 随机信号(a)与正弦信号(b)

Fig. 1 Random signal(a) and sinusoidal signal(b)

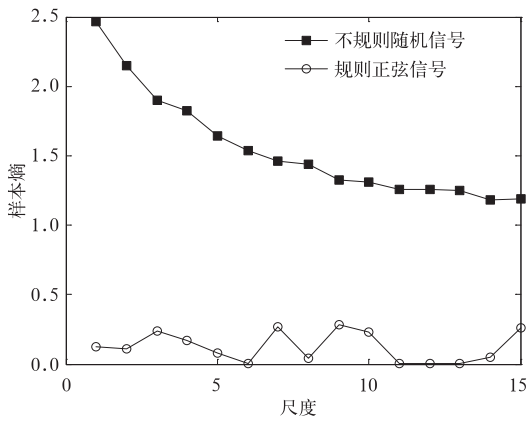


图 2 不同尺度随机信号和正弦信号的熵
Fig. 2 The entropy of random signal and sinusoidal signal with different scales

2.2 参数的选取

计算样本熵 $E_{SP}(m, r, N)$ 时, 由式(2)可以看出样本熵的值与嵌入维数 m 、阈值 r 以及数据的长度 N 有关。3 个相关参数取不同值, 得到的样本熵也会不同。为了得到在不规则先导应用中的最优参数, 本研究探讨了上述关键参数选取方法。对于数据长度 N , 由于不同的闪电事件所持续的时间不同, 因此 N 根据梯级先导和不规则先导各自所持续时间的实际情况来选取。而嵌入维数 m 和阈值 r

的选取则以熵值随 N 的取值不同变化最小为标准。

2.2.1 嵌入维数 m 的选取

嵌入维数 m 和近似熵的选择类似, 一般 m 取值范围为 $1 \sim 4$ 。本研究采用 2012 年广州从化野外观测试验中 7 月 30 日采集的 3 次不规则先导过程, 分别取 500, 3000, 5000 不同的数据点数, 令阈值 r 一定 ($r = 0.15D_s$), 然后分析当 m 取不同值 ($m = 1, 2, 3, 4$) 时, 样本熵的变化情况, 结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 3 组数据的样本熵均因 m 的取值不同和 N 的取值不同有所变化。经计算, 3 组样本数据均为当 $m = 2$ 时样本熵随 N 的变化最小, 仅为 $1\% \sim 6\%$ 。这表明, 当 $m = 2$ 时, 样本的长度对样本熵值影响最小, 因此对于本文需要分析的闪电信号 $m = 2$ 为嵌入维数的选择参数值。

2.2.2 阈值 r 的选取

对于阈值 r 的选取, r 过大会丢失一些统计信息, 而过小则效果不明显, 因此一般 r 取 $0.1D_s \sim 0.25D_s$ 。本文对于阈值 r 的选取同样取 3 组数据长度不同 ($N = 500, 3000, 5000$) 的不规则先导样本数据, 令嵌入维数取最优值 $m = 2$, 分析当阈值 r 取不同值 ($r = 0.1D_s, 0.15D_s, 0.2D_s, 0.25D_s$) 时样本熵变化情况, 结果如表 2 所示。

表 1 不规则先导的 $E_{SP}(m, 0.15D_s, N)$

Table 1 $E_{SP}(m, 0.15D_s, N)$ of the chaotic leader

m	样本 1				样本 2				样本 3			
	$N=500$	$N=3000$	$N=5000$	变化率/%	$N=500$	$N=3000$	$N=5000$	变化率/%	$N=500$	$N=3000$	$N=5000$	变化率/%
1	0.99	0.99	0.90	8	1.18	1.40	1.23	4	0.77	0.70	0.69	10
2	0.82	0.82	0.77	5	0.89	1.06	0.90	1	0.61	0.59	0.58	6
3	0.81	0.80	0.73	9	0.82	0.98	0.80	2	0.60	0.53	0.52	14
4	0.75	0.77	0.70	7	0.85	0.91	0.74	13	0.52	0.50	0.48	7

注: 变化率指 $N=5000$ 时相对于 $N=500$ 时的样本熵的变化。下同。

表 2 不规则先导的 $E_{SP}(2, r, N)$

Table 2 $E_{SP}(2, r, N)$ of the chaotic leader

r	样本 1				样本 2				样本 3			
	$N=500$	$N=3000$	$N=5000$	变化率/%	$N=500$	$N=3000$	$N=5000$	变化率/%	$N=500$	$N=3000$	$N=5000$	变化率/%
$0.1D_s$	1.06	1.12	1.07	2	1.17	1.36	1.17	0.1	0.74	0.74	0.74	0.4
$0.15D_s$	0.82	0.83	0.78	5	0.89	1.06	0.91	1	0.62	0.59	0.58	6
$0.2D_s$	0.67	0.66	0.60	10	0.72	0.88	0.75	4	0.53	0.49	0.47	11
$0.25D_s$	0.55	0.55	0.49	12	0.62	0.76	0.64	5	0.46	0.41	0.40	13

由表 2 可以看出, 当 r 与 N 取不同值时, 得到不同的样本熵。经计算, 当 $r = 0.1D_s$ 时, 与其他阈值 r 相比, 3 组样本数据的样本熵值随 N 的变化最小仅为 $0.1\% \sim 4\%$ 。因此取 $r = 0.1D_s$ 为本研究的参数。

2.3 先导信号的多尺度熵分析

具有高频辐射能量的不规则先导与梯级先导及直窜先导可以在快电场变化波形上看出不同。如图 3 所示, 梯级先导发生在首次回击之前, 产生较为规律的脉冲式快电场变化, 这些先导脉冲多为单一极

性且与随后的回击极性一致,脉冲宽度约为 $1.6 \sim 10.0 \mu\text{s}$,平均为 $4.6 \mu\text{s}$,脉冲间隔一般为 $5 \sim 20 \mu\text{s}$,平均为 $15 \mu\text{s}$ ^[21-25]。而直窜先导和不规则先导大多发生在继后回击之前,其中直窜先导没有明显的脉

冲簇,不规则先导则产生连续的脉冲簇。从快电场变化的波形可以看出,这类脉冲簇无论从脉冲极性、脉冲宽度还是脉冲间隔等方面均呈现出明显的不规则性。

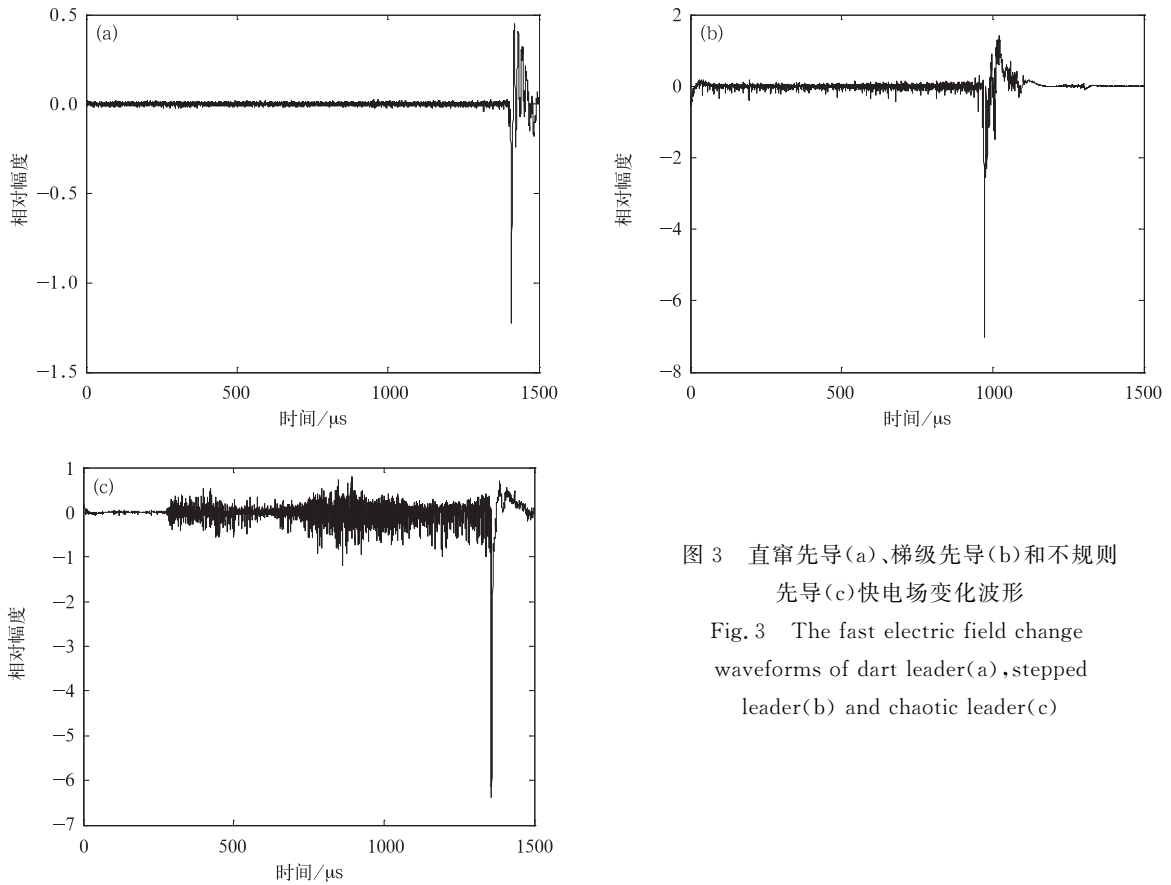


图 3 直窜先导(a)、梯级先导(b)和不规则先导(c)快电场变化波形
Fig. 3 The fast electric field change waveforms of dart leader(a), stepped leader(b) and chaotic leader(c)

本研究对 2012 年广州从化野外观测试验中 7 月 30 日的两次不规则先导过程和两次梯级先导及两次直窜先导的电场快变化过程进行多尺度熵分析。由于梯级先导的脉冲序列集中在首次回击前 $200 \mu\text{s}$ 的时间范围内^[25],因此梯级先导的数据取回击前的 $200 \mu\text{s}$,数据长度为 $N=2000$,直窜先导和不规则先导则持续的时间较长,取 $500 \mu\text{s}$ 的数据分析,数据长度为 $N=5000$ 。其他参数取最优值,维数 $m=2$,阈值 $r=0.1D_s$ 。图 4 给出了两次不规则先导过程的电场快变化以及两次梯级先导和直窜先导电场快变化在 15 个尺度下的多尺度变化熵。由图 4 可以看出,不规则先导和直窜先导熵在尺度上的变化是先增大后趋于稳定,而梯级先导的复杂度在尺度上整体呈缓慢增长趋势。值得注意的是,不规则先导的熵在各个尺度上均大于梯级先导和直窜先导。这验证了多尺度熵方法在不规则先导区分中

的可行性。

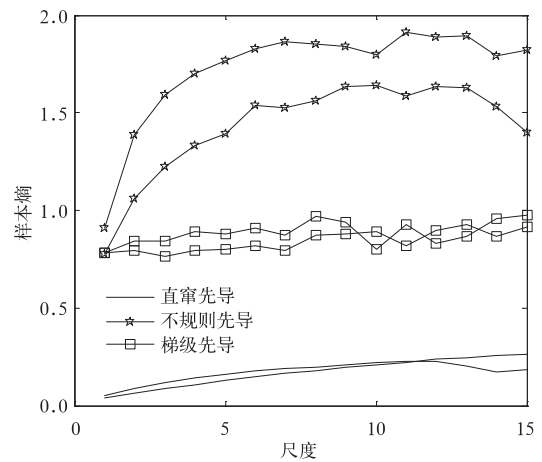


图 4 梯级先导与不规则先导多尺度熵比较
Fig. 4 Multi-scale entropy comparison between stepped leader and the chaotic leader

2.4 先导信号的多尺度熵特征

基于上述认识,本文统计分析了 30 次不规则先导过程和 30 次梯级先导的多尺度熵。由于不规则先导多发生在继后回击之前,因此也统计分析了 30 次直窜先导过程的多尺度熵。考虑尺度太大数据量会很少,重构中加入嵌入维数后不能使得相空间完全展开,因此只分析 10 个尺度下的样本熵变化。通过对比 3 种先导的多尺度熵平均值变化曲线(图 5)可以看出,不规则先导的样本熵在尺度小于 4 的范围内明显增加;当尺度大于 4 时,变化趋于平稳。直窜先导的样本熵也是一个先增大后趋于平稳的过程,而梯级先导的样本熵在尺度上的变化不大,整体呈增加趋势。此外,分别对 3 种先导各 30 次个例进行统计,由样本熵大小可以看出,当尺度小于 3 时,部分梯级先导的熵值与不规则先导相近,样本熵约为 1.0,并不能通过样本熵来完全区别。但随着尺度的增加,当尺度不小于 3 时,不规则先导在各个尺度的熵值(E_{sp} 为 1.5~3)都大于梯级先导和直窜先导的熵值($E_{sp} < 1.5$),完全可以通过样本熵值来区别不规则先导与梯级先导和直窜先导。

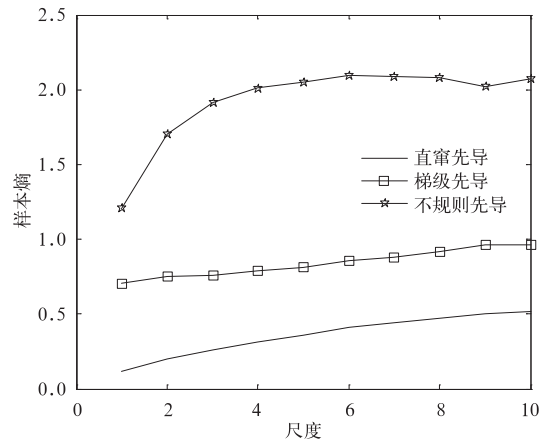


图 5 直窜先导与梯级先导及不规则先导的多尺度熵

Fig. 5 Multi-scale entropy statistical analysis and comparison between dart leader, stepped leader and the chaotic leader

表 3 给出了 30 次直窜先导和 30 次梯级先导及 30 次不规则先导在不同尺度下样本熵的平均值、最大值以及最小值。可以看出,直窜先导在各个尺度的平均值变化范围为 0.12~0.51;梯级先导在不同

表 3 直窜先导、梯级先导与不规则先导的样本熵特征
Table 3 Entropy features of dart leader stepped leader and the chaotic leader

尺度	直窜先导			梯级先导			不规则先导		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
1	0.1202	0.5203	0.0072	0.7060	1.2214	0.4309	1.2021	2.3356	0.7126
2	0.1985	0.7521	0.0128	0.7498	1.2929	0.3849	1.7055	2.3379	1.1297
3	0.2599	0.7803	0.0172	0.7616	1.2814	0.3734	1.9150	2.4108	1.3624
4	0.3145	0.8307	0.0221	0.7875	1.2425	0.4075	2.0139	2.6005	1.5211
5	0.3557	0.8551	0.0268	0.8111	1.2231	0.4215	2.0532	2.5217	1.5161
6	0.4122	0.8711	0.0311	0.8549	1.3519	0.4513	2.0956	2.8274	1.5393
7	0.4440	0.8821	0.0354	0.8822	1.3135	0.4853	2.0894	2.5642	1.5600
8	0.4732	0.8930	0.0394	0.9156	1.4629	0.4929	2.0826	2.6472	1.5700
9	0.5027	0.9218	0.0432	0.9645	1.4789	0.5245	2.0175	2.6232	1.5284
10	0.5138	0.9852	0.0463	0.9620	1.4390	0.5381	2.0728	2.8824	1.5192

尺度的平均值变化范围为 0.7~0.96;不规则先导在不同尺度的平均值变化范围为 1.2~2.0;在大于 3 的尺度范围内,不规则先导熵平均值较为稳定,且不存在与规则先导熵重叠的区域,因此,可以将尺度大于 3 的多尺度熵作为不规则先导的特征熵,其平均值变化范围为 2.0~2.1,最大值范围为 2.6~2.8,最小值范围为 1.51~1.59。

3 结论及讨论

本文首次将多尺度熵方法用于不规则先导的区

分和鉴别,通过对多尺度熵的参数选择及直窜先导、梯级先导和 不规则先导多尺度熵的对比研究,得出以下结论:

- 1) 多尺度熵分析方法能够应用在直窜先导与梯级先导及不规则先导的区分与鉴别中,适用于闪电先导信号的优化参数嵌入维数取 $m=2$, 阈值取 $r=0.1D_s$ 。
- 2) 可以将尺度大于 3 的多尺度熵作为不规则先导的特征熵,其平均值变化范围为 2.0~2.1,最大值为 2.6~2.8,最小值为 1.51~1.59。
- 3) 熵值在小尺度范围内变化明显,且当尺度大

于3时,样本熵大于1.5的过程为不规则先导过程;熵在尺度上变化不明显,且当尺度大于3时,样本熵小于1.5的过程为梯级先导或直窜先导过程。

电场波形的熵代表了电场脉冲的不规则程度,而电场波形中脉冲特征则与先导发展的放电过程相关;对于直窜先导或梯级先导来说,较低的熵值说明其放电比较规律,而不规则先导在小尺度范围内的较大熵,直接展示了在此范围内的放电尺度、极性及强度的无规律性,说明在继后回击发生前的某一时段,其先导发展通道某一位置电条件的不连续性。

参考文献

- [1] 张义军,周秀曦. 雷电研究的回顾和进展. 应用气象学报, 2006,17(6):829-834.
- [2] 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.
- [3] 任晓毓,张义军,吕伟涛,等. 闪电先导随机模式的建立与应用. 应用气象学报,2011,22(2):194-202.
- [4] 李俊,吕伟涛,张义军,等. 一次多分支多接地的空中触发闪电过程. 应用气象学报,2010,21(1):95-100.
- [5] 张义军,杨少杰,吕伟涛,等. 2006—2011年广州人工触发闪电观测试验和应用. 应用气象学报,2012,23(5):513-522.
- [6] Weidman C D. The Submicrosecond Structure of Lightning Radiation Fields. Arizona:University of Arizona,1982.
- [7] Willett J C, Bailey J C, Leteinturier C, et al. Lightning electromagnetic radiation field spectra in the interval from 0.2 to 20 MHz. *J Geophys Res*, 1990, 95(D12):20367-20387.
- [8] Rakov V A, Uman M A. Waveforms of first and subsequent leaders in negative lightning flashes. *J Geophys Res*, 1990, 95(D10):16561-16577.
- [9] Davis S M. Properties of Lightning Discharges from Multiple-station Wideband Electric Field Measurements. Florida: University of Florida, 1999.
- [10] Gomes C, Cooray V, Fernando M, et al. Characteristics of chaotic pulse trains generated by lightning flashes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66(18): 1733-1743.
- [11] Mäkelä J S, Edirisinghe M, Fernando M, et al. HF radiation emitted by chaotic leader processes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, 69(6):707-720.
- [12] Lan Y, Zhang Y J, Dong W S, et al. Broadband analysis of chaotic pulse trains generated by negative cloud-to-ground lightning discharge. *J Geophys Res*, 2011, 116(D17), doi:10.1029/2010JD015159.
- [13] 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.
- [14] Pincus S. Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure. *Chaos*, 1995, 5(1):110-117.
- [15] Pincus S. Approximate Entropy as a Measure of System Complexity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1991:2297-2301.
- [16] Costa M, Goldberger A L, Peng C K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. *Physical Review Letters*, 2002, 89(6):8102.
- [17] Costa M, Goldberger A L, Peng C K. Multiscale entropy analysis of biological signals. *Physical Review E*, 2005, 71(2): 1906.
- [18] 葛家怡,周鹏,赵欣,等. 脑电信号的多尺度熵分析. 计算机工程与应用,2009,45(10):13-15.
- [19] 蔡瑞,卞春华,宁新宝. 多尺度熵在心率变异信号复杂性分析中的应用. 北京生物医学工程,2007,26(5):543-544.
- [20] 陈建萍. 多尺度熵方法用于电子器件噪声分析. 西安:西安电子科技大学,2007.
- [21] Krider E P, Radda G J. Radiation field wave forms produced by lightning stepped leaders. *J Geophys Res*, 1975, 80(18): 2653-2657.
- [22] Krider E P, Weidman C D, Noggle R C. The electric fields produced by lightning stepped leaders. *J Geophys Res*, 1977, 82(6): 951-960.
- [23] Beasley W H, Uman M A, Jordan D M, et al. Simultaneous-pulses in light and electric field from stepped leaders near ground level. *J Geophys Res*, 1983, 88(C13):8617-8619.
- [24] Cooray V, Lundquist S. Characteristics of the radiation fields from lightning in Sri Lanka in the tropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1985, 90(D4): 6099-6109.
- [25] 鄒秀书,张义军,刘欣生,等. 广东一次雷暴过程负地闪先导的电学特征分析. 气象学报,2001,59(3):341-351.

The Multi-scale Entropy Feature of the Chaotic Leader in the Cloud-ground Lightning

Li Chan¹⁾²⁾ Zhang Yang²⁾ Lü Weitao²⁾³⁾ Zheng Dong²⁾ Tan Yongbo¹⁾³⁾

¹⁾ (College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

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

Abstract

The chaotic leader is different from stepped leader and dart leader with distinctive features. It has many narrow pulses, causing strong high-frequency radiation. The pulse occurs right at the position of preceding stepped leader and dart leader, but its structure, width and interval all show significant irregularities. The chaotic leader is a new and special one with no exact definition of its pulse characterization so far.

Multi-scale entropy is applied to the analysis of chaotic leader, and some key parameters applying in the lightning irregular pulse signal analysis are given after detailed analysis. Dart leader signal, stepped leader signal and the chaotic leader signal are analyzed with the given method and the results are compared, and case studies of the three-leader multi-scale entropy features prove the feasibility of this method. It's found out through statistical analysis that 3 leaders are different in entropy value especially when the scale is greater than 3, and thus they can be clearly distinguished by entropy values. Entropy value greater than 1.5 may indicate chaotic leader, and entropy value less than 1.5 is classified as stepped leader or dart leader. Furthermore chaotic leader and dart leader entropy value both increase with scales first and then stabilize but stepped leader entropy value doesn't change much. Characteristic entropy values for the chaotic leader are given: The average is about 2.0—2.1, the maximum is 2.6—2.8, and the minimum is 1.51—1.59. Based on the analysis of multi-scale entropy characteristics of 3 leaders, the physical meaning of the irregularity is also discussed. The irregularity degree of chaotic electric field pulse can be reflected by the entropy value: The greater the entropy value is, the greater the degree of irregularity. The characteristics of the electric field pulse in the waveform is directly related with the development of the discharge process. For the dart leader or stepped leader, the smaller entropy value illustrates that its discharge is regular. The chaotic leader in small scale with larger entropy directly demonstrates that in this range scale its discharge, polarity and intensity are irregular. It shows the electric discontinuity somewhere in the leader development channel during a certain period before the occurrence of subsequent stroke.

Key words: sample entropy; multi-scale entropy; dart leader; stepped leader; chaotic leader