

DOI:10.16136/j.joel.2023.12.0535

闪电 AR 谱的多重分形特性分析及放电类型的识别

火元莲*, 张健, 安娅琦

(西北师范大学 物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:对闪电时域波形的分形研究由于忽略了其频率特性,致使复杂多变的闪电过程的全部特性无法得到充分表征。针对此问题,本文将多重分形理论引入到现代谱估计中,提出了一种基于AR(auto-regressive)谱的闪电电场信号的多重分形特性分析及放电类型的识别方法。首先基于AR模型谱估计法获得闪电电场信号的功率谱,然后,通过多重分形去趋势波动分析(multifractal detrended fluctuation analysis, MF-DFA)法验证了闪电AR谱序列具有多重分形特性,并进一步对AR谱序列的Hurst指数以及多重分形谱进行了讨论,最后将相关参数作为闪电信号的有效特征值输入支持向量机进行了云闪(intracloud lightning)和地闪(cloud-to-ground lightning, CG)不同放电类型的识别。实验结果表明,本文方法对云、地闪信号的有效识别率达到了94%以上,该研究成果对闪电的特性研究与自动化识别技术均具有一定的参考价值。

关键词:闪电电场信号; AR谱估计; 多重分形; Hurst指数

中图分类号:92.60.Pw,64.60.al **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2023)12-1313-08

Analysis of multifractal characteristics of lightning AR spectrum and discharge type identification

HUO Yuanlian*, ZHANG Jian, AN Yaqi

(College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The fractal study of the lightning time domain waveform ignores its frequency characteristic, so that all the characteristics can not be fully characterized. In order to solve this problem, this paper introduces the multifractal theory into modern spectral estimation, and proposes a multifractal characteristic analysis and discharge type identification method of the lightning electric field signal based on auto-regressive (AR) spectrum. Firstly, the power spectrum of the lightning electric field signal is obtained based on the AR model spectrum estimation method. Then the multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA) method is used to verify that the lightning AR spectrum sequence has multifractal characteristics, and the Hurst exponent and multifractal spectrum of AR spectrum sequence are further discussed. Finally, these parameters are input into support vector machine as the effective eigenvalues to identify different discharge types of intracloud lightning (IC) and cloud-to-ground lightning (CG). The experimental results show that the effective recognition rate of the proposed method reaches more than 94%. The research results have certain reference value for the research of lightning characteristics and automatic recognition technology.

Key words: lightning electric field signal; estimation of AR spectrum; multifractal; Hurst exponent

0 引言

闪电是一种在空气中的长距离放电现象,同时也是一种灾害性天气现象。根据闪电发生位置

的不同,将其分为云闪(intracloud lightning, IC)和地闪(cloud-to-ground lightning, CG),其中地闪是雷电灾害的主要来源。对闪电信号的高效与精准识别将有助于最大化地提升防雷预警技术的有效

* E-mail: hylqq@nwnu.edu.cn

收稿日期:2022-07-21 修订日期:2022-11-20

基金项目:国家自然科学基金(61561044)和甘肃省自然科学基金(20JR10RA077, 23JRRA692)资助项目

性与精准性,减少发生闪电灾害时的社会损失,在气象自然灾害预测方面具有非常重要的现实意义和工程应用价值。随着非线性理论和复杂性科学在信息处理学科领域的研究与应用,使得对像闪电的自然现象的新认识成为可能。研究发现,闪电信号具备典型的非线性特征,闪电现象的复杂性正是反映了其非线性的本质^[1]。由MANDEL-BROT提出的分形理论是非线性科学研究中一个十分活跃的分支,并被广泛应用于自然科学和社会科学的许多领域中^[2-5]。由于分形和雷电表现的相似性,国内外很多学者将分形理论应用于雷电研究中,并取得了一定的成果,其应用可大致归纳为如下两个方面:1)雷电防护中闪电通道的分形建模;2)闪电通道的分形维数等参数计算、分析与应用。最早在1987年TSONIS等^[6]利用相机技术和数值模拟方法求出了地闪的分形维数。以后VECCHI^[7]、任顺平等^[8]证实了雷电分形闪道维数与雷电辐射场分形维数一致的结论。苟学强等^[9]对雷暴强放电前地面电场以及地闪首次回击辐射场的多重分形特性进行了讨论,并利用慢天线资料分析得出负地闪首次回击辐射场信号的分形维数平均为1.4。MIRANDA等^[10]首次将多重分形分析应用于云闪、地闪、无分支的、有分支的、单次回击以及多次回击等不同类别的闪电光学信号的分析中,发现每个类别均有具体的分形维数值,而且最大的分形维数对应于复杂的闪电通道。姜苏等^[11]将多重分形去趋势波动分析(multifractal detrended fluctuation analysis, MF-DFA)法用于研究极低频瞬态事件发生前1 s背景信号中的长程相关性与多重分形特性,并利用相关特征进行Q-burst(为极低频中的大振幅电磁瞬态脉冲)的自动识别。火元莲等^[12,13]通过对闪电分形特性的进一步研究,创新性地将分形维数、多重分形谱参数等作为闪电放电过程中相对稳定的特征,用于云、地闪不同放电类型的识别以及地闪回击的快速检测中,取得了较高的识别和检测率。

但现有文献对于闪电分形的研究局限于时域进行,或仅将其作为闪电复杂性研究的一个方面,或仅通过闪电波形的时间幅度序列信息提取出分形特征参数,以此为特征检验量设计闪电识别检测方法。事实上,闪电放电是一个动态演变的过程,其不仅具有时间特性,还具有频率特性。不同的放电类型会表现出不同的频率分布,只通过时域的闪电分形研究虽有一定的发现,但难以找出更深层次的规律和特征,无法充分描述复杂多变的闪电过程其全部特性,也就是仅在时域来描述经过复杂非线性动力学演化过程而形成的闪电结构显然是不够的。基于此,本文提出了采用AR(auto-regressive)模型的谱

估计法和MF-DFA法来研究闪电的非线性动力学演化过程,并将闪电AR谱的多重分形特征参数用于云、地闪不同闪电放电类型的识别中。该方法首先采用基于AR模型的谱估计法获得闪电电场信号的功率谱,然后,通过MF-DFA法证实闪电的AR谱序列具有多重分形特性,并进一步对AR谱序列的Hurst指数以及多重分形谱进行了讨论,最后利用频域的多重分形参数构造了4个特征值,将其输入到支持向量机进行了云闪和地闪不同放电类型的识别,并和利用时域多重分形特征进行识别的结果进行了对比。

1 算法原理

1.1 AR谱估计方法

AR模型又称自回归模型,是一种线性预测模型,通过序列的自相关函数矩阵来估计功率谱,且具有更高的频率分辨率。实际中,对获取的闪电电场时间序列信号 $X(n)$ 的AR模型可表示为:

$$X(n) = \sum_{k=1}^P a_{p,k} x(n-k) + u(n), \quad (1)$$

式中, p 是模型的阶次, $a_{p,k}(k=1,2,\dots,P)$ 是AR模型的系数, $u(n)$ 是方差为 δ^2 的高斯白噪声。AR模型阶数 p 的选择是一个关键问题,若阶次太小($k < p$)导致功率谱过于平滑,谱峰重叠,得到的分辨率较低;若阶次太大($k > p$),通常认为阶次越大,频率分辨率越大,但由于阶次太大就会引起估计误差变大,产生虚假谱峰。本文选择最终预测误差准则(final prediction error criterion, FPE)来确定AR谱的阶数 p 。

$$FPE(k) = P_r \frac{N + (k + 1)}{N - (k + 1)}, \quad (2)$$

式中, P_r 为功率预测误差,是递减的, N 为序列的长度,当阶数 k 从1开始慢慢增加, $FPE(k)$ 在某一 k 处取得极小值,将此时的 k 定为最合适的阶数 p 。

模型输出的功率谱密度为:

$$S_X^{AR}(f) = \frac{\delta^2}{|1 - \sum_{k=1}^P a_{p,k} \exp(-j\pi k f)|^2}. \quad (3)$$

显然只要求出 δ^2 以及所有的 $a_{p,k}$ 值就可以估计出闪电电场信号的功率谱了。此类方法隐藏着数据的外推,而不是假设观测区以外的数据为0,所以谱的分辨率比经典谱估计高。

对模型参数 $a_{p,k}$ 以及白噪声方差 δ^2 可以通过解Yule-Walker方程(3)来获得:

$$r_x(m) = \begin{cases} -\sum_{k=1}^P a_k r_x(m-k) & m \geq 1 \\ -\sum_{k=1}^P a_k r_x(k) + \sigma^2 & m = 1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $r_x(m)$ 是观测得到的闪电电场信号 $X(n)$ 的自相关函数。

由于 Burg 算法具有求得频率分辨率高且较容易实现的特点, 本文采用 Burg 算法求解 AR 模型的参数。其中 p 阶前、后向预测误差为:

$$\begin{cases} e_p^f(n) = e_{p-1}^f(n) + k_p e_{p-1}^b(n-1) \\ e_p^b(n) = e_{p-1}^b(n) + k_p e_{p-1}^f(n-1) \end{cases}, \quad (5)$$

其中

$$k_p = \frac{-2 \sum_{n=p+1}^N e_{p-1}^f(n) e_{p-1}^b(n-1)}{\sum_{n=p+1}^N [|e_{p-1}^f(n)|^2 + |e_{p-1}^b(n-1)|^2]}, \quad (6)$$

式中, k_p 是反射系数, 通过式(6)求得 k_p 后, 根据 Levinson-Durbin 递推公式可得到功率谱估计。

1.2 MF-DFA

MF-DFA 在分形中得到广泛应用, 它能够使具有多重分形特征的非平稳序列具有更可靠的多重分形特性, 因此给非平稳序列的多重分形标度分析带来一个新的视角。对于闪电电场信号功率谱的非平稳序列 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 其给定长度为 N 。MF-DFA 如下^[14]:

1) 求取闪电电场信号功率谱非平稳序列的平均值 \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k. \quad (7)$$

2) 从原序列中减去平均值 \bar{x} , 构造闪电电场信号功率谱轮廓:

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i [x_k - \bar{x}], \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

3) 将闪电电场信号功率谱轮廓划分成 $N_s = \text{int}(N/s)$ 等长非重叠窗口, 序列长度 N 不一定是窗口长度 s 的整数倍。因此, 该过程可能会忽略序列 $Y(i)$ 末端的一小部分, 从序列的末端重复此划分过程, 得到 $2N_s$ 个等长非重叠窗口。用 m 阶多项式拟合 $2N_s$ 个窗口中每个窗口内的 s 个点, 方差计算如下:

$$F(s, v) = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2}, \quad (9)$$

式中, $y_v(i)$ 是第 v 个区间的 m 阶多项拟合式, m 是多项式的拟合阶数。

4) 对于每个子区间 $v (v = 1, 2, \dots, N_s)$, 用最小二乘法拟合局部趋势函数, 消除子区间的局部趋势序列, 区间序列的方差计算结果如下:

$$F(s, v) = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[N - (v - N_s)s + i] - y_v(i)\}^2}. \quad (10)$$

5) 对于每个区间 $v = N_{(s+1)}, \dots, 2N_s$, q 阶波动函数计算如下:

$$F_q(q, s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^s(s, v)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}, \quad (11)$$

当 $q=0$ 时, 波动函数为:

$$F_q(0, s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln [F^s(s, v)] \right\}, \quad (12)$$

式中, q 为参数 ($q \in R, q \neq 0$), q 阶的 Hurst 指数 h_q 定义为每个 q 阶均方根回归线的斜率。一般来说, 指数 h_q 依赖于 q , 会随着 q 的增加而单调减小, 说明该序列是多重分形的, 如果指数 h_q 不依赖于 q , 则该序列为单分形。

6) 确定波动函数的标度指数, 对于每个 q , 如果 $F_q(s)$ 遵循幂律, 对于 $\log F_q(s) - \log s$ 的斜率就是 q 阶 Hurst 指数 $H(q)$ 。

$$F(q, s) \sim s^{h(q)}. \quad (13)$$

对于每段序列 s , 均可获得对应的波动函数值 $F_q(s)$ 。如果 $h(q) = 0.5$, 则该序列不具有相关性或具有短程相关性。如果 $0.5 < h(q) < 1$, 序列的相关性是持久的, 如果 $h(q) < 0.5$, 则序列存在反持续性的长程相关性。

此外, 为了度量自相关的多重分形程度, 定义:

$$\Delta h = \max[h(q)] - \min[h(q)]. \quad (14)$$

如果 Δh 越大, 则表明分形程度越强。

7) 由统计物理的勒让德变化得到多重分形谱。

$$\tau(q) = qh(q) - 1, \quad (15)$$

$$\alpha = d\tau/dq, \quad (16)$$

$$f(\alpha) = q\alpha - \tau(q), \quad (17)$$

式中, $\tau(q)$ 为质量指数, 若 $\tau(q)$ 随着 q 的增大而增大且存在非线性关系, 表明此序列存在多重分形特性, 反之, 不存在多重分形特性; α 为奇异性指数或局部分形指数, 用来描述各区间不同的分形程度; $f(\alpha)$ 为多重分形谱, 它表示奇异性指数 α 的分形维数。多重分形谱的宽度 $\Delta\alpha (\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min})$, 反应了整个分形结构的概率分布的不均匀程度以及过程的复杂性。 $\Delta\alpha$ 越大表示序列分布越不均匀, 则该序列的多重分形程度越强。

2 闪电电场 AR 谱的多重分形特性分析

2.1 数据来源

本文使用的是 2009 年 7—8 月在青海大通地区进行的雷电综合观测实验中快电场记录仪的数据, 青海大通地区是一个典型的多山地区且地形较为复杂, 平均海拔高度约为 2534 m。受地形影响具有比

较明显的气候垂直差异,夏季通常会有对流云系形成,属雷电多发区。在以明德为中心、其周围半径 10 km 范围内共建立了 7 个观测站,所有观测站周围没有能够直接影响观测的强电磁辐射源,每个测站均安装有甚高频闪电辐射脉冲接收系统(中心频率 270 MHz,3 dB 带宽 6 MHz),以及用于闪电快电场变化测量的宽带电场变化测量仪(带宽 0—10 MHz,时间常数 100 μ s,动态范围 ± 3.5 V)、快电场测量仪(带宽 0—5 MHz,时间常数 1 ms,动态范围 ± 10 V,采样频率 2.5 MHz)、慢电场测量仪(带宽 0—2 MHz,时间常数 6 s,动态范围 ± 1 V)及大气平均电场仪(± 50 kV/m);这些仪器获得模拟信号通过数字化 A/D 板卡转换后送入 PC 微机被同步记录。7 个测站的信号与 GPS 进行同步,同步精度为

50 ns,且所有观测仪器由宽带电场记录仪触发。规定电场正向变化,对应云中的负电荷被中和,反之亦然,并且将相对电场值进行了归一化处理。

2.2 闪电电场的 AR 谱

AR 模型的阶数直接影响到谱估计的质量,本文基于最终预测误差准则和多次实验结果,最终确定 AR 阶数为 200。图 1 为单次负地闪电电场信号及云闪电电场信号基于经典的 FFT 频谱和 AR 模型谱估计的结果比较。从图中可明显看出,云闪信号 FFT 谱的频率强度较地闪的要大,几乎是地闪 FFT 谱强度的 7—8 倍,但都存在频率分辨率低、频谱能量向旁瓣泄露等缺陷。而基于 AR 模型法得到的二者的功率谱估计均取得了较好的分辨率,同时在平滑性方面也得到了很大的改善。

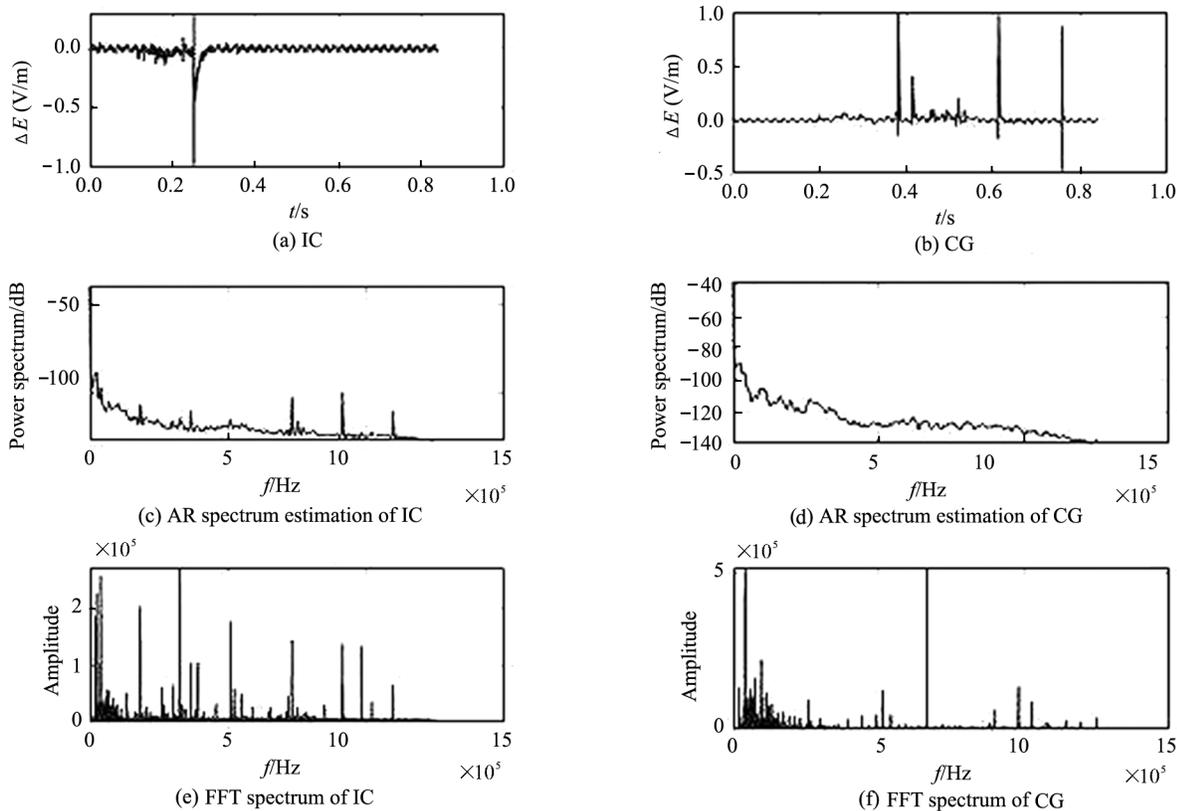


图 1 闪电信号的 AR 谱

Fig. 1 The AR spectrum of lightning signal

对于云、地闪不同闪电电场信号的 AR 谱进行 MF-DFA 分析,得到标度指数 $\tau_{AR}(q)$ 与波动函数阶数 q 之间的变化曲线,如图 2 所示。从图中可知 $\tau_{AR}(q)-q$ 关系曲线都是上凸的且存在明显的非线性关系,从而验证了闪电 AR 谱具有多重分形的特点。

2.3 闪电 AR 谱的多重分形特征分析

闪电信号 AR 谱在频率轴上的波动实际就是复杂

信号动力学机制的外在表现,为描述闪电 AR 谱的波动情况,绘制了 q 取值分别为 -10、-6、-2、2、6、10 时的 $\log F_q(s)-\log s$ 双对数最小二乘拟合关系曲线如图 3 所示,曲线的斜率为 Hurst 指数 $H_{AR}(q)-q$ 。从图中可以看出,波动函数尺度具有较好的线性关系且 $F_q(s)$ 会随着尺度 s 的增大而增大,进一步验证了闪电 AR 谱序列的多重分形特性。

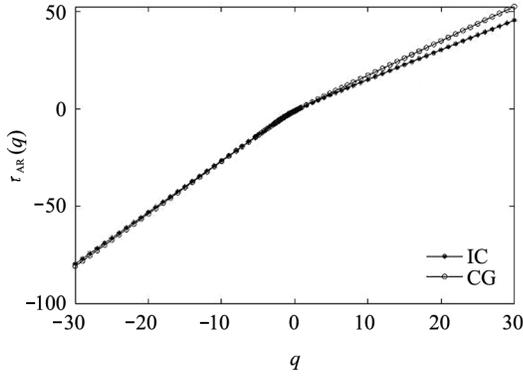


图 2 $\tau_{AR}(q)$ - q 关系图

Fig. 2 The relation of $\tau_{AR}(q)$ - q

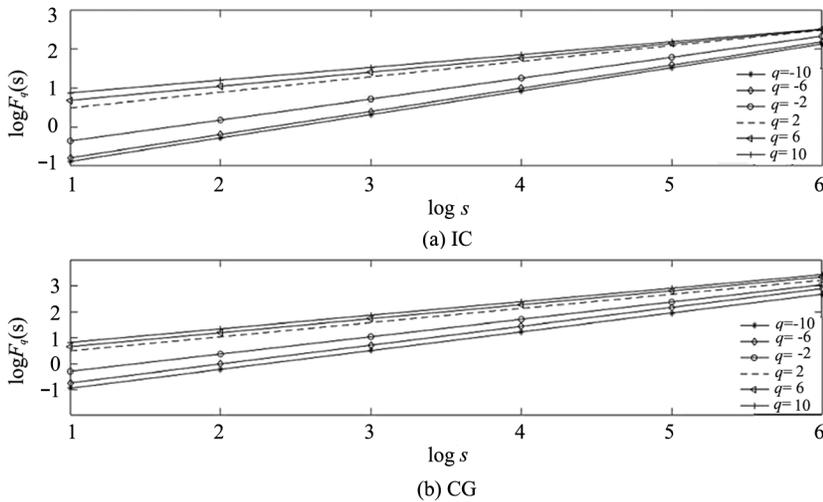


图 3 闪电信号 AR 谱 $\log F_q(s)$ - $\log s$ 图

Fig. 3 $\log F_q(s)$ - $\log s$ of the AR spectrum of lightning signal

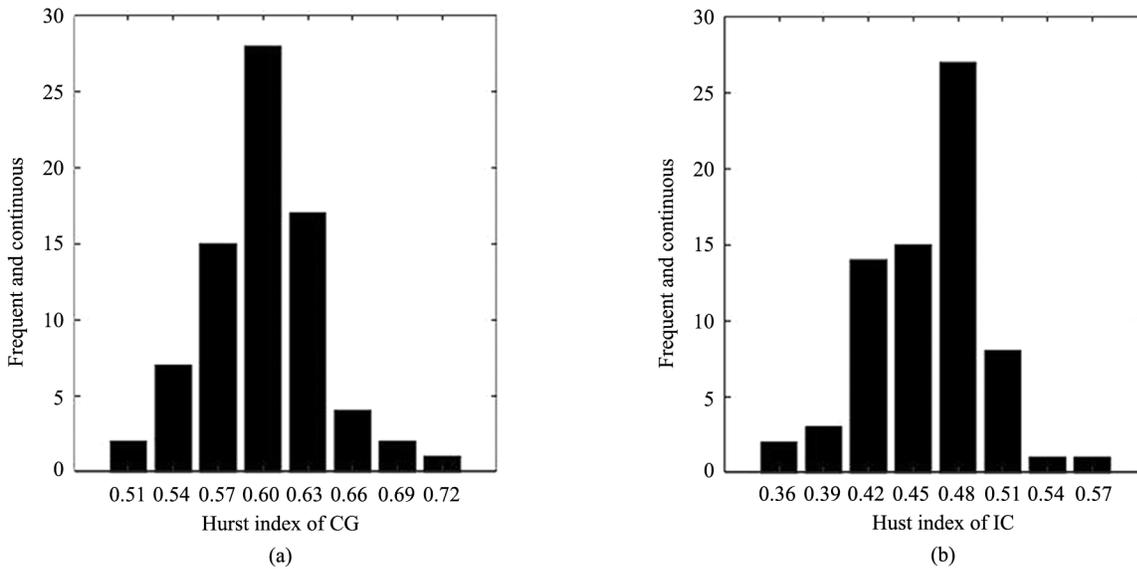


图 4 云、地闪电信号的 AR 谱的 Hurst 指数分布直方图: (a) 地闪; (b) 云闪

Fig. 4 Histogram of Hurst exponent distribution of AR spectrum of lightning signal:

(a) Could-to-ground lightning; (b) Intracloud lightning

图 4 为云、地闪 AR 谱 Hurst 指数分布直方图, 显然, 闪电 AR 谱 Hurst 指数基本符合正态分布。从图中可以看出, 云、地闪 AR 谱 Hurst 指数大致分布在 0.35—0.7 之间, 地闪 AR 谱的 Hurst 指数与云闪 AR 谱的 Hurst 指数有明显的差别, 地闪 AR 谱的平均 Hurst 指数为 0.6, 云闪 AR 谱的平均 Hurst 指数为 0.48。云闪 AR 谱的 Hurst 指数小于地闪 AR 谱的 Hurst 指数。这主要是因为 Hurst 指数 (H) 与分形维数 (D) 满足 $H + D = 2$ 的关系, 云闪 AR 谱分形维数 (D) 大于地闪 AR 谱分形维数 (D), 云闪比地闪更加复杂, 通常分维数越大, 高频成分所占比例就较大, 又因为云闪在放电过程中因击穿空气辐射放出大量的高频脉冲。Hurst 指数大小正好相反, 同

时也进一步说明了云闪信号的分形程度大于地闪信号。

图5为闪电AR谱序列的Hurst指数 $H_{AR}(q)-q$ 与 q 的关系图, q 取值为 $[-30,30]$ 。图5结果表明, $H_{AR}(q)$ 是一个递减函数,进一步说明了闪电AR谱存在多重分形特性。云、地闪在较宽的时间尺度范围内具有无标度性^[15],但云闪在无标度区小尺度具有较大的变化特性,而地闪在无标度区大尺度具有较大的变化特性,以及通过图4的分析得出,地闪AR谱的Hurst指数大于0.5,云闪AR谱的Hurst指数小于0.5。进一步说明地闪AR谱序列中大尺度占主导地位,云闪AR谱序列中小尺度占主导地位,因此云、地闪AR谱的 $H_{AR}(q)$ 曲线在 $q > 0$ 时存在较明显的差异。

为进一步度量云、地闪信号AR谱多重分形特征的不同,随机选取云、地闪各10例信号计算了其AR谱的 $\Delta h = \max[h(q)] - \min[h(q)]$,如表1所示。 Δh 越大,说明闪电AR谱的分形程度越强。从表1可以发现,云闪信号AR谱的 Δh 值比地闪信号AR

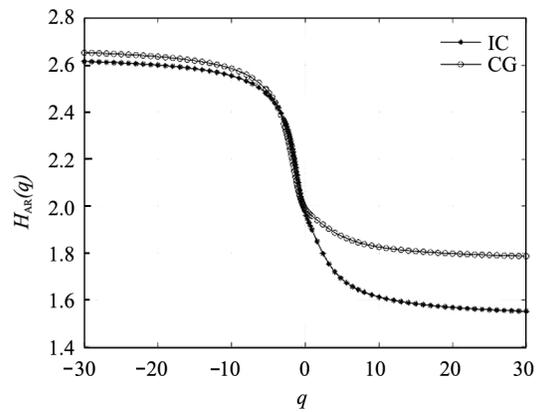


图5 $H_{AR}(q)-q$ 关系图

Fig. 5 The relation of $H_{AR}(q)-q$

谱的 Δh 值大,从而说明云闪信号的多重分形程度强于地闪信号的多重分形程度。

图6为云、地闪电场信号AR谱的多重分形谱图 $f(\alpha)-\alpha$,形状是一个单峰形拱形图像且峰值接近于1。多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 反映了在尺度不变的情下,整个分形结构概率分布的不均匀程度以及过程的复

表1 云、地闪电信号的AR谱的 Δh

Tab. 1 The Δh of the AR spectrum of IC and CG

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IC	1.136	1.193	1.197	1.235	1.376	1.246	1.149	1.134	1.209	1.286
CG	1.125	0.953	0.998	1.008	0.985	1.221	1.054	0.977	1.096	1.137

杂性, $\Delta\alpha$ 越大,表明分布越不均匀且分形程度越强。当 $\Delta\alpha = 0$ 时,表示序列完全均匀分布, α_0 处对应谱函数 $f(\alpha)$ 的极大值, α_0 越小,表明分形程度越强。表2给出了随机挑选的10例云闪与10例地闪AR谱的 α_0 与 $\Delta\alpha$ 的值,观察图6和表2不难发现,云闪AR谱的多重分形谱极大值对应的 α_0 小于地闪,但云闪AR谱的多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 大于地闪AR谱。这些内容和已有文献中在时域上对闪电分形研究的结论是一致的。

通过上述对云、地闪AR谱的 Δh 、 $\Delta\alpha$ 、 α_0 以及 $H_{AR}(q)$ 的分析可以看出,当 Δh 和 $\Delta\alpha$ 越大、 α_0 和 $H_{AR}(q)$ 越小时,说明闪电电场信号的多重分形程度越强。

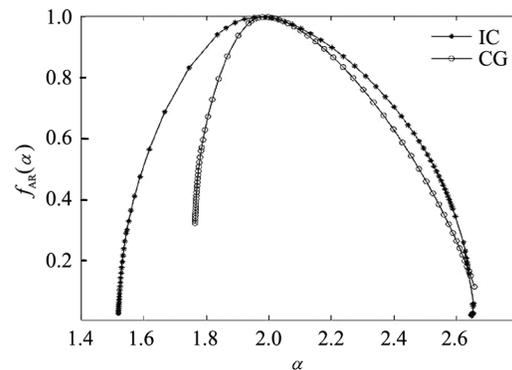


图6 闪电电场信号多重分形谱 $f_{AR}(\alpha)-\alpha$ 的关系图

Fig. 6 The relation of $f_{AR}(\alpha)-\alpha$ of multifractal spectrum of lightning electric field signal

表2 云、地闪电信号的AR谱的 α_0

Tab. 2 The α_0 of the AR spectrum of IC and CG electric field signal

Number	1	2	3	4	6	7	8	9	10
IC(α_0)	1.932	1.815	1.965	1.832	1.839	1.736	1.815	1.639	1.825
CG(α_0)	1.963	2.185	2.000	1.965	1.956	1.982	1.965	1.968	1.883
IC($\Delta\alpha$)	1.226	1.253	1.117	1.335	1.344	1.129	1.194	1.269	1.346
CG($\Delta\alpha$)	1.025	0.953	0.998	1.008	1.121	1.054	0.977	1.096	0.927

2.4 云、地闪不同放电类型的识别

综合上述分析,本文选取闪电电场信号 AR 谱的 Hurst 指数 $H_{AR}(q)$ 、Hurst 指数的绝对差 Δh 、频谱宽度 $\Delta\alpha$ 以及频谱最大值时对应的 α_0 4 个特征值作为信号的鉴别性特征,然后用支持向量机技术进行云闪和地闪不同放电类型的识别。

首先按照目前对不同闪电放电过程电场变化波形的认识,对 500 例闪电信号进行人工分类,结果为 200 例云闪信号、300 例地闪信号。然后将 500 例闪电信号分为训练集和测试集,其中训练集包含 120 例云闪信号和 200 例地闪信号,其余 80 例云闪信号和 100 例地闪信号作为测试集。将训练集中云闪信号设置标签为“1”,地闪信号设置标签为“0”。接着让训练集对支持向量机进行训练,之后对所测试的云、地闪信号进行分类识别。为了体现闪电信号基于频域分形特征分析的优势,本文将频域分析结果和时域分析结果进行对比,在时域是直接对闪电时间序列应用 MF-DFA 法提取相同特征,识别对比结果如表 3 所示。其中计算识别率的公式如(18)式所示:

$$R = \frac{C}{G} \times 100\%, \quad (18)$$

式中, R 是识别率, C 是识别正确的样本数, G 是测试的总样本数。

表 3 云、地闪信号识别结果

Tab. 3 The result of IC and CG recognition

Test sample	Recognition rate based on AR spectrum /%	Recognition rate based on time domain spectrum/%
CG	94.8	89.2
IC	97.2	93.5
CG+IC	96	91.6

从表 3 可见,基于闪电 AR 谱的云、地闪信号各自的识别率以及总的识别率都达到了 94% 以上,而在时域中,由于云、地闪电场信号的多重分形谱宽度差别不明显,导致识别率降低了。同时表明,闪电 AR 谱的多重分形参数不仅可以作为闪电复杂性研究的一个方面,同时可作为云、地闪自动识别的鉴别性特征。

3 结 论

本文针对在时域分析闪电分形特征及识别研究的局限性,将多重分形理论引入到现代谱估计理论

中,提出了一种基于 AR 谱和 MF-DFA 的闪电多重分形特性分析及放电类型的识别方法。首先证明了闪电电场信号 AR 谱序列具有多重分形特性,并在此基础上利用 AR 谱序列的多重分形参数间存在的差异性,将其应用于云、地闪不同放电类型的识别中。仿真实验结果表明,基于频域分形特征对闪电放电类型的有效识别率达到了 94% 以上,要优于时域的分析结果,并且对充分描述复杂多变的闪电过程的频域特性和发展闪电信号的自动化识别研究均具有一定的指导意义和参考价值。

参考文献:

- [1] GUO S, WANG J, GAN R, et al. Experimental study of cloud-to-ground lightning nowcasting with multisource data based on a video prediction method[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 604.
- [2] ROJAS H E, CRUZ A S, CORTES C A. Characteristics of electric field waveforms produced by negative return strokes in Colombia and their comparison with other regions[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2022, 227: 105809.
- [3] AGBAZO M, N'GOBI G K, ADECHINAN A J, et al. Multifractal characteristics of cloud-to-ground lightning intensity observed in AMMA-CATCH station (Northern Benin) [J]. Bulletin of Atmospheric Science and Technology, 2020, 1(1): 43-57.
- [4] HOU J X, WANG Y E. Rapid identification of rice seed based on inverse Fourier transform of laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18(8): 495-501.
- [5] LI G F, NIE X B, XU Y X. Photocarriers dynamics in zinc selenide nanocrystal studied with optical pump-Terahertz probe spectroscopy[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(9): 973-979.
李高芳, 聂小博, 许艳霞. 基于光抽运-太赫兹探测技术的 ZnSe 纳米薄膜的光致载流子动力学特性[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(9): 973-979.
- [6] TSONIS A A, ELSNER J B. Fractal characterization and simulation of lightning[J]. Contributions to Atmospheric Physics, 1987, 60(2): 187-192.
- [7] VECCHI G, LABATE D, CANAVERO F. Fractal approach to lightning radiation on a tortuous[J]. Radio Science, 1993, 29(4): 619-627.
- [8] REN S P, CHI J P, ZHUANG H C, et al. Simulation upon fractal lightning channel and its radiation[J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 11-14.
任顺平, 迟建平, 庄洪春, 等. 分形闪电及其电磁场辐射

- 仿真[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 11-14.
- [9] GOU X Q, ZHANG Y J, QIE X S, et al. Characterization of radiation field of return stroke of cloud-to-ground lightning with local effective Holder exponent[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 75-78.
苟学强, 张义军, 鄢秀书, 等. 地闪回击辐射场的局地等效 Holder 指数特征[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 75-78.
- [10] MIRANDA F J, SHARMA S R. Multifractal analysis of lightning channel for different categories of lightning[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2016, 145: 34-44.
- [11] JIANG S, ZHANG Q L, HUANG K L, et al. Multifractal analysis of ELF transient events based on MF-DFA[J]. Chinese Journal Space Science, 2015, 35(3): 324-329.
姜苏, 张其林, 黄凯丽, 等. 基于 MF-DFA 的极低频瞬态事件多重分形分析[J]. 空间科学学报, 2015, 35(3): 324-329.
- [12] HUO Y L, ZHANG G S, LV S H, et al. Fractal characteristics research of lightning and its application to automatic recognition[J]. Acta Physics Sinica, 2013, 62(5): 574-582.
火元莲, 张广庶, 吕世华, 等. 闪电的分形特征研究及其在自动识别中的应用[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 574-582.
- [13] HUO Y L, FANG Y, LONG X Q. Lightning electric field signals recognition based on EMD and fractal theory[J]. Journal of Northwest Normal University, 2019, 55(5): 33-38.
火元莲, 方叶, 龙小强. 基于 EMD 和分形理论的闪电电场信号识别研究[J]. 西北师范大学学报, 2019, 55(5): 33-38.
- [14] SHRESTHA K, GRUNDY B D, CHEN N, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of return on bitcoin[J]. International Review of Finance, 2021, 21(1): 312-323.
- [15] GOU X Q, ZHANG Y J, DONG W S, et al. Time-clustering properties in radiation event sequences of cloud flash[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(3): 644-647.
苟学强, 张义军, 董万胜, 等. 云闪辐射脉冲序列的丛集特征[J]. 高原气象, 2008, 27(3): 644-647.

作者简介:

火元莲 (1973—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事闪电信号处理、图像处理方面的研究。