

闪电的分形特征研究及其在自动识别中的应用*

火元莲^{1)2)†} 张广庶¹⁾ 吕世华¹⁾ 袁萍²⁾

1) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

2) (西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

(2012年8月1日收到; 2012年9月10日收到修改稿)

利用2009年夏季青海地区的快电场变化测量仪的野外观测资料,对120例地闪和77例云闪辐射场信号的分形特征进行了深入研究,结果表明地闪辐射场信号的分形维数与云闪辐射场信号的分形维数有明显的差别,再利用闪电的分形维特征,构造了5个特征值,将其作为支持向量机的输入进行地闪和云闪不同放电类型的识别,有效识别率达到95%以上;通过构造地闪辐射场时间序列信号的分形维数轨迹图表明分形维数最低点对应于原时间序列的回击位置,利用分形维数轨迹中的最低点的位置能够快速准确地对地闪辐射场信号的回击点进行检测,检测率可达到100%.分形维是闪电的一种具有鉴别性的特征,可用于闪电的智能分析与自动化处理.

关键词: 闪电信号, 分形维数, 支持向量机, 自动识别

PACS: 92.60.Pw, 64.60.al

DOI: 10.7498/aps.62.059201

1 引言

闪电是发生于自然界的一种瞬时高电压、大电流、强电磁辐射的大气放电现象,同时也是一种灾害性天气现象.随着现代化技术的发展和观测手段的提高,如何对更加精细和全面的闪电观测资料进行有效分析,如何有效识别不同的闪电放电类型,如何对地闪的回击做出快速准确地检测等问题的深入研究对认识闪电的物理机制及雷电防护工作具有重要的意义^[1-3].近年来对复杂性问题的探索和研究使人们认识到像闪电这种短时、突变的复杂过程用分形几何学^[4,5]的方法研究,比较符合客观事实.早在1987年, Tsonis等^[6]就利用照相资料和数值模拟的方法得出了地闪通道的分形维数分别为1.34和1.37;上世纪90年代以后 Vecchi等^[7]、任顺平等^[8]通过模拟,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^[9,10]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^[11].现有的文献都只讨论闪电具有分形特征,但没有进一步研究如何有效利用闪电的分形特征.

为了在闪电的防护和应用中更具针对性,闪电放电类型的识别一直被研究者所关注.早在20世纪70年代 Krider等^[12,13]对闪电电场波形特征进行了观测及统计分析,确立了鉴别正负地闪波形参数,同时研制了闪电地闪定位系统; SAFIR^[14]系统通过低频电场波形特征区分云闪和地闪; LASA^[15-18]三维全闪定位系统更是充分利用闪电电场波形的特征,通过计算电场波形的上升时间、下降时间、脉冲宽度等特征,实现对多种闪电事件的区分;刘恒毅等^[19]利用闪电快电场变化资料从电场波形时域特征进行分析,实现了对地闪回击、双极性窄脉冲事件的自动识别;李鹏^[20]、项震^[21]等通过闪电光电信号的同步观测,对云闪和地闪进行了识别研究.现有研究大多是基于测量波形特征进行的,利用闪电波形构造一组特征向量,然后将每个闪电的这组特征值输入分类器进行闪

* 国家自然科学基金(批准号: 41075002, 40775004)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 41030960)和公益性行业科研专项基金(批准号: GYHY201006005-03)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: huoyuanlian@163.com

电放电类型的识别,其分类器大都采用基于经验风险最小化准则下的算法,其缺陷是在小样本情况下往往会导致过拟合而使泛化性变差.

对识别而言,特征的选择是至关重要的,闪电的分形维是闪电重要的物理特征.本文通过对青海地区云闪和地闪的分形维统计发现,云闪和地闪的分形维特征具有明显的差异.进一步利用闪电的分形维特征构造了最小值、平均值、峰度、标准差、极差五个特征值用于闪电不同放电类型的识别.分类器采用支持向量机 (support vector machines, SVM). SVM 是基于结构风险最小化准则下的分类器,能够很好地克服传统分类器面临的不足.

作为地闪标志性特征的回击,若能实时地进行快速自动检测对闪电探测与防护具有重要的作用.本文通过构造地闪辐射场时间序列信号的分形维轨迹,发现回击处对应的分形维数比其他位置的分形维数要低的多,分形维数轨迹呈现出明显的波谷,其余时段的分形维数轨迹的变化就比较平缓.用分形维数轨迹图中的最低点的位置能够快速准确地对地闪辐射场信号的回击进行检测,而不用像是在时域需要用电场波形的多个参量才能实现检测.

2 闪电的分形特征研究

2.1 实验数据

本文分析的数据是 2009 年 7 月—8 月在青海大通地区进行的雷电综合观测实验记录,实验场地以明德为主观测中心,在其周围半径 10 km 范围内还设有新庄、苗圃、药草、极乐、良教及斜沟 6 个测站,观测站平均海拔高度约为 2534 m,受地形影响,夏季常有对流云系形成,属雷电多发区.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 6s,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 微机同步记录.7 个测站的信号以 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同步

记录,实现了在高时间分辨率下对闪电多参数的快速、同步、连续记录.文中选取了两次较强雷暴过程中的快电场资料进行分析,这里规定电场正向变化,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 闪电信号的分形维数计算

闪电信号虽然是包含了从低频到甚高频的各种频率成分,但随着对闪电特征及其物理机制的深入研究表明,闪电信号的波形参数(脉冲上升时间,持续时间等)基本相近,所以可用分形理论来研究闪电特性.分形维数(或称为分维数)作为分形集的一个极其重要的特征参数,主要用来定量地描述对象的不规则性和自相似性,在一定区间内具有标度不变性.标度不变性是指无论测量的尺度如何改变,所测量对象的形态特性、复杂程度、不规则性、统计特性等均不发生变化.事实上,闪电辐射场信号时域波形可以看作二维空间的开曲线,信号波形在一定尺度下局部与整体之间具有统计相似性.如果从分形维数估算过程中所得的 $\log(1/r)-\log N(r)$ 对数关系图上看,标度不变性是指在不同的测量尺度 r 下,不同的点对 $(\log(1/r), \log N(r))$ 能够分布在一条直线上,该直线的斜率就是闪电辐射场信号的分形维数.分形维数的估计有许多方法,本文用最广泛应用的盒计数法^[22]来估算闪电辐射场信号的分维数.

设闪电辐射场信号 $x(i) \subset X$, X 是 n 维欧氏空间 R^n 上的任意非空有界子集.将 R^n 划分成尽可能小的宽度为 r 标度的正方形网格,若 $N(r)$ 是网格宽度为 r 的离散空间上覆盖 X 集最少网格个数即盒数,则 $x(i)$ 盒维数定义为

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg(1/r)}. \quad (1)$$

盒数 $N(r)$ 表明波形在标度 r 下的不规则性或复杂性,与波形分布有关.盒维数 D 表明了这种复杂性随 r 减小而加剧的速率.由于闪电辐射场离散信号 $x(i)$ 的最高分辨率为采样时间间隔 Δt ,所以上式极限无法按其定义 $r \rightarrow 0$ 求出.实际计算中,在分形对象无标度区 $(k_1 r, k_2 r)$ 内,将一系列尺度为 r 的方形网格对其进行覆盖,得到各尺度下的有效覆盖网格数量 $N(r)$,通过最小二乘法得到拟合直线 $\log(1/r)-\log N(r)$,其斜率就是闪电辐射场的分维数 D .

图 1 所示结果为闪电个例辐射场信号的分维数计算所得的 $\log(1/r)$ - $\log N(r)$ 拟合直线, 从图上可以明显地看出, 在双对数坐标下, 点对 $(\log(1/r),$

$\log N(r))$ 都近似分布在一条直线上, 这表明闪电辐射场信号波形具有标度不变性, 具有明显的分形特征.

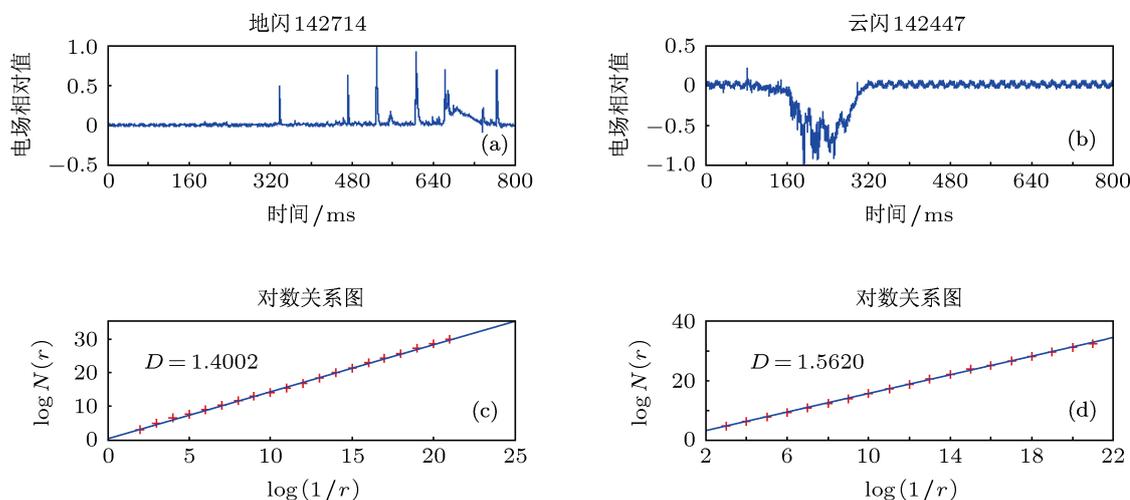


图 1 地闪和云闪辐射场信号及分维数拟合直线 (a) 地闪辐射场信号; (b) 云闪辐射场信号; (c) 地闪辐射场分维数拟合直线; (d) 云闪辐射场分维数拟合直线

2.3 云闪与地闪信号的分形维数统计

把分形维数作为一个特征值进行闪电信号的定量分析, 通过对地闪和云闪辐射场信号分形维数的统计分析, 建立闪电辐射场强度与分形维数的关系, 探讨闪电信号分形维数所反映的物理意义, 研究闪电信号的分形统计特征. 选择同一雷暴过程在良教和新庄两个测站的记录资料进行了统计分析, 由于个别信号记录不全, 导致所挑选的两个测站的信号个数不一致. 表 1 给出了良教站云闪和地闪辐射场信号的分形维数的统计特征, 表 2 所列为新庄站云闪和地闪辐射场信号的分形维数的统计特征. 从表 1 和表 2 能够看到闪电辐射场信号的分形维数大致分布于 1.25—1.7 之间, 地闪的分形维数与云闪的分形维数有明显的差别, 地闪辐射场的平均分维数为 1.4, 云闪辐射场的平均分维数为 1.5, 云闪辐射场信号比地闪辐射场信号要复杂. 一般来讲, 闪电辐射场信号的分形维数越大, 意味着信号频谱结构中高频成分越多; 分形维数越小, 相应的高频成分少. 因云闪放电过程击穿空气常常辐射出大量的高频脉冲, 较地闪而言所包含的高频成分要多, 所以云闪的分形维数值要大于地闪的分形维数值. 从表 1 和表 2 的计算结果也能够看到距离对闪电分形维数的影响不是很大. 图 2 为地闪和云闪信

号的分形维数统计结果的直方图分布, 由图可看出, 闪电信号的分形维数基本符合正态分布.

表 1 良教站地闪和云闪信号分形维数统计特征

闪电类型	个例数目	平均值	范围或值	标准偏差
地闪	120	1.4439	1.5970—1.2796	0.0619
云闪	77	1.5053	1.6698—1.3161	0.0592

表 2 新庄站地闪和云闪信号分形维数统计特征

闪电类型	个例数目	平均值	范围或值	标准偏差
地闪	98	1.4495	1.5719—1.2962	0.0577
云闪	72	1.5207	1.6913—1.3497	0.0508

图 3 显示了闪电放电的辐射场强度与分形维数的关系曲线, 从图中可看到, 当辐射场强度较小时, 分形维数在最大和最小之间剧烈变化, 具有极大的不确定性, 分析原因可能此时受观测场地环境, 闪电发生的距离等因素的影响比较大; 其余情况下分形维数基本维持在 1.5 左右上下稍有波动, 意味着分形维数是闪电放电过程的一个相对稳定的特征, 考虑可将此特征用于闪电不同放电类型的识别中.

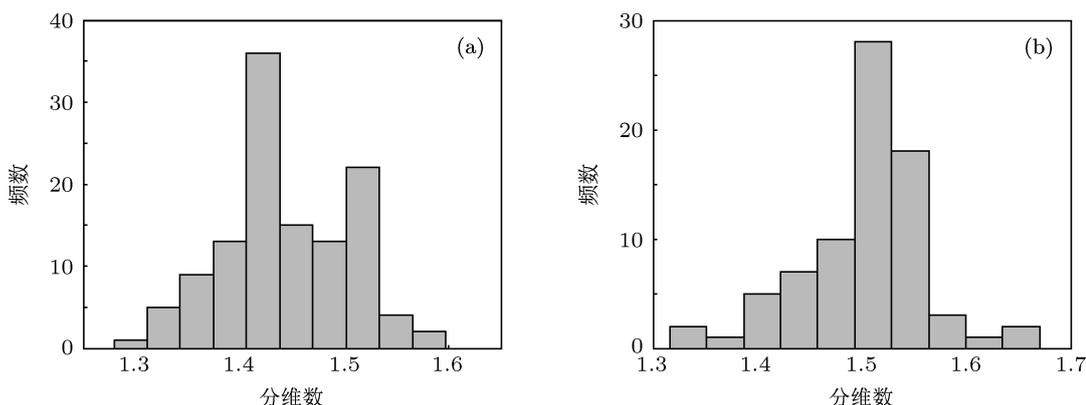


图2 地闪和云闪辐射场信号分维数分布直方图 (a) 地闪; (b) 云闪

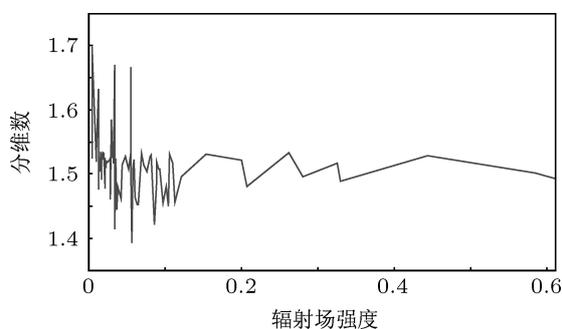


图3 闪电辐射场信号强度与分形维数关系曲线

3 基于分形维特征与支持向量机的闪电信号识别

3.1 支持向量机

支持向量机^[23]是在统计学习理论的基础上形成的、基于结构风险最小化准则的学习方法,能较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小值等问题,在模式识别和函数逼近等领域得到了广泛的应用.支持向量机的目的是找到一个最优分类超平面,使得它能尽可能多的将两类数据正确分离.

假定大小为 L 的训练样本集 $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, L\}$ 由两类别组成,如果 $x_i \in R^d$ 属于第一类,则标记为正 ($y_i = 1$); 否则,标记为负 ($y_i = -1$).假定存在分类超平面 H 为

$$\omega \cdot x + b = 0, \quad (2)$$

使得

$$y_i(\omega \cdot x + b) \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, L, \quad (3)$$

则构造最优超平面的问题就转化为在条件 (3) 下使

分类间隔最大化的问题,得到的最优分类函数为

$$y(x) = \text{sgn}[\omega \cdot \phi(x) + b] = \text{sgn}[\alpha_i y_i K(x_i, x) + b], \quad (4)$$

式中的拉各朗日乘子 α_i 可通过下列目标函数得到:

$$\begin{aligned} \max L(\omega, b, \xi, \alpha) &= \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j), \\ \text{s.t. } \alpha_i &\geq 0, \quad \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

容易证明,只有很少的 α_i 不为 0, 其对应的样本就是支持向量^[24].支持向量机可用图 4 说明,实心点和空心点代表两类样本, H 为分类线, H_1, H_2 分别为过各类中离分类线最近的样本且平行于分类线的直线,它们之间的距离叫做分类间隔 (margin), H_1, H_2 上的训练样本点就是支持向量.

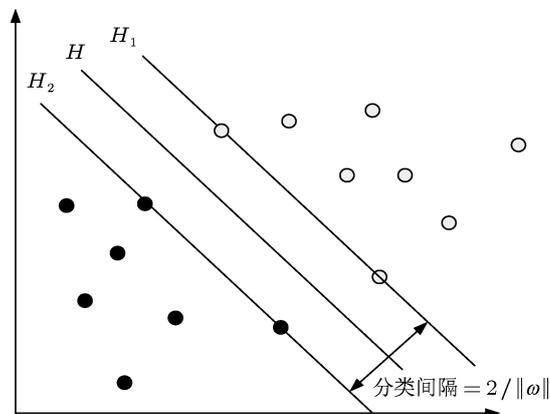


图4 支持向量机原理图

3.2 基于分形维特征与支持向量机的闪电信号识别

在模式识别中, 信号特征的选择对识别精度具有决定性的作用. 本文根据地闪和云闪两类信号分形维数特征的统计分析, 选取分形维数的最小值、平均值、峰度、标准差、极差五个特征值作为信号的特征, 然后用支持向量机技术进行识别, 其中支持向量机选择多项式核函数, 指数为 2. 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 197 例闪电进行人工分类, 结果云闪 77 例, 地闪 120 例. 为了验证选取特征的合理性与有效性, 再从中选取 29 例闪电信号 (16 例云闪, 13 例地闪), 计算各例信号的 5 个特征值, 计算结果如表 3 所示, 然后用支持向量机进行分类, 分类结果如图 5 所示. 从图 5 不难发现, 16 例云闪和 13 例地闪各自具有很好的聚类性, 云闪和地闪之间具有很好的分离性, 说明选择的特征是合理的与有效的, 用支持向量机能够很好地对云闪和地闪分类.

表 3 云闪和地闪的五个分形特征值的计算结果

闪电类型	闪电编号	最小值	平均值	极差	标准差	峰度
云闪	0805140347	1.296	1.534	0.305	0.030	18.806
	0805141523	1.372	1.531	0.236	0.029	6.526
	0805141613	1.324	1.524	0.279	0.046	7.940
	0805141719	1.265	1.519	0.349	0.047	7.311
	0805141806	1.279	1.508	0.323	0.053	5.704
	0805142104	1.336	1.525	0.267	0.038	8.534
	0805142201	1.332	1.522	0.270	0.041	6.834
	0805142233	1.283	1.514	0.320	0.053	5.754
	0805142318	1.389	1.517	0.208	0.041	4.067
	0805142549	1.320	1.517	0.275	0.043	5.772
	0805142611	1.424	1.529	0.180	0.029	3.853
	0805142749	1.297	1.534	0.309	0.029	22.241
	0805142754	1.277	1.523	0.328	0.049	11.581
	0728152926	1.387	1.533	0.223	0.031	7.028
	0728155307	1.371	1.532	0.232	0.029	7.429
	0728160052	1.408	1.531	0.202	0.028	4.903
地闪	0805141046	1.152	1.520	0.457	0.056	17.372
	0805141440	1.117	1.513	0.488	0.065	14.709
	0805142714	1.091	1.476	0.505	0.094	6.823
	0805141937	1.177	1.517	0.419	0.047	18.890
	0805141435	1.077	1.479	0.523	0.101	7.425
	0805141046	1.048	1.525	0.560	0.052	35.072
	0728155706	1.058	1.461	0.540	0.116	4.445
	0728160132	1.1	1.504	0.502	0.070	12.704
	0728160303	1.001	1.476	0.600	0.109	6.746
	0728160401	1.035	1.490	0.559	0.082	10.444
	0728161717	0.954	1.483	0.654	0.113	7.742
	0728164348	1.047	1.462	0.549	0.114	4.947
	0728165451	0.950	1.445	0.649	0.131	4.626

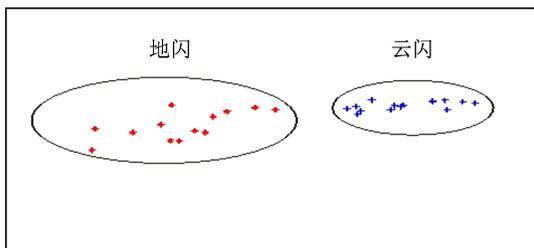


图5 云闪和地闪的分类结果

其次, 将 197 例闪电信号分为两组分别作为训练样本和测试样本. 训练样本组包含有 70 例地闪信号和 47 例云闪信号, 测试样本组包含有 50 例地闪和 30 例云闪. 首先用训练样本对支持向量机进行训练, 然后对测试样本进行识别, 训练样本中地闪类别为“-1”, 云闪类别为“1”, 数据分析的目标是依据这些原始数据将测试样本的类别“-1”与“1”正确区分. 识别结果如表 4 所示. 其中识别率计算公式如下:

$$\text{识别率} = \frac{\text{正确识别样本数}}{\text{测试的样本数}} \times 100\%. \quad (6)$$

从表 4 发现, 云闪和地闪各自的识别率都达到 90% 以上, 且地闪的识别率高达 96%. 实验结果表明, 闪电的分形维数是闪电信号的一种重要的具有鉴别性的特征, 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一个重要特征.

表 4 利用支持向量机技术的闪电类型识别结果

测试样本	识别率/%
地闪	96
云闪	93.3
地闪 + 云闪	95

4 基于分形维特征的地闪回击点检测

4.1 分形维数轨迹的构造

一般来说, 估算闪电辐射场整个时间序列的分形维数并没有很大的意义, 而是需要建立整个时间序列的分形维数轨迹, 以便更加有效地反映闪电辐射场时间序列的变化特征. 建立闪电信号时间序列的分形维数轨迹的基本方法是将一定宽度的时间窗口以一定的移动间隔沿着闪电信号时间序列滑

动, 把时间序列划分成一系列的窗口, 再估算每个窗口区域的分形维数, 然后由一系列窗口的分形维数值形成闪电信号时间序列的分形维数轨迹. 由于分形维数与时间序列各成分的特性密切相关, 各成分的特性不同分形维数也就不同, 所以, 分形维数轨迹能够表明分形维数是如何沿着时间序列发生变化的, 从而把时间序列各成分的特征表现出来.

在分形维数轨迹的构造过程中, 时间窗口的宽度和移动间隔是两个非常重要的参数. 窗口宽度决定了一个窗口内的样本点的数目, 窗口宽度太小时, 时间序列的自相似性就会丢失, 维数将非常不稳定, 分形维数值便会产生错误; 窗口宽度太大时, 窗口内就会包含很多具有不同特性的信号, 波形的分形维数值就会被变成一个平均值, 波形内的明显特征就变得模糊. 窗口移动间隔决定了相邻两个窗口的开始点之间的间隔, 取值范围从单个样点到窗口宽度. 间隔较小时会造成许多冗余计算, 间隔较大时重要的过渡特征可能被漏掉. 因此, 时间窗口的宽度和移动间隔影响着闪电信号分形维数轨迹的形状特征. 图 6 显示了设置不同的窗口宽度和窗口间隔时所得闪电辐射场信号的分形维数轨迹图, 其中图 6(a) 为闪电快电场信号, 图 6(b) 和 (c) 分别为不同的窗口宽度和窗口间隔时的分形维数轨迹图. 考虑到闪电信号的变化特性和计算的效率, 结合多次实验的结果最终将时间窗口的宽度设为 2048 样点, 窗口间隔取 1024 样点较为合适, 即使分形维数值比较稳定, 而且使得闪电过程中各阶段放电特性被显著地区分开.

4.2 基于分形特征的地闪回击点检测

闪电信号的分形维数轨迹基本上反映了闪电信号的时域特征和位置特征, 闪电信号各成分的复杂性和时域特性的不同使得相邻成分的分形维数轨迹存在着显著的差异. 本文通过对 80 例地闪快电场变化的时间序列构造其分形维数轨迹的分析发现, 地闪回击处对应的分形维数比其他位置的分形维数要低的多, 分形维数轨迹呈现出明显的波谷, 其余时段的分形维数轨迹的变化就比较平缓, 而且一般越强的回击对应的分形维数越小. 图 7 所示结果为包括只有一次回击的正地闪和三次回击的负地闪个例的快电场信号及构造的分形维数轨迹图. 从实验仿真图中可看到分形维数最低点 (图中 * 点) 对应于原时间序列中的回击位置 (虚线). 因此可以将分形维数轨迹图中的最低点作为地闪回击点的

检测依据, 通过构造时间序列的分形维数轨迹这样的简单办法对闪电回击点位置进行可靠的自动检测, 而不用像是在时域需要用电场波形的多个参量

才能实现检测. 实验结果表明, 利用分形维数轨迹中的最低点的位置能够快速准确地对地闪辐射场信号的回击点进行检测, 有效检测率达到 100%.

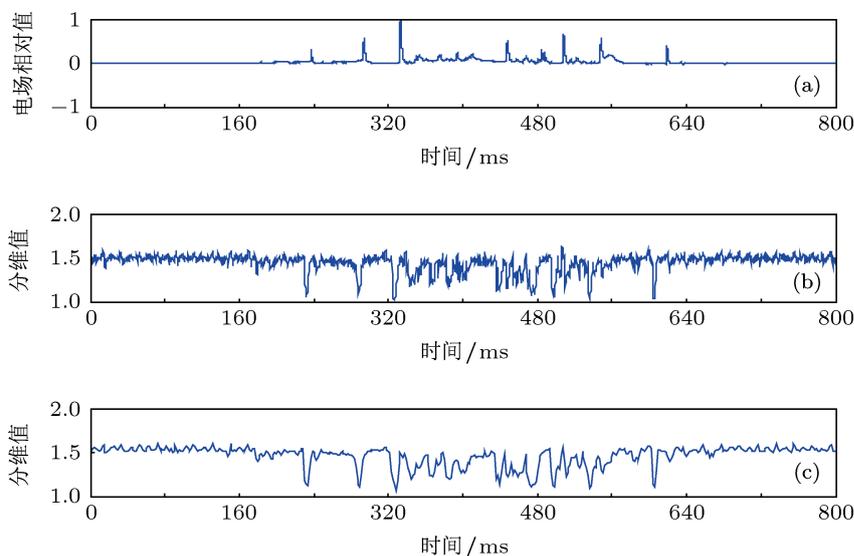


图6 闪电(143053)辐射场信号及分维数轨迹图 (a) 快电场信号; (b) 窗口宽度 512 点, 窗口间隔 256 点; (c) 窗口宽度 2048 点, 窗口间隔 1024 点

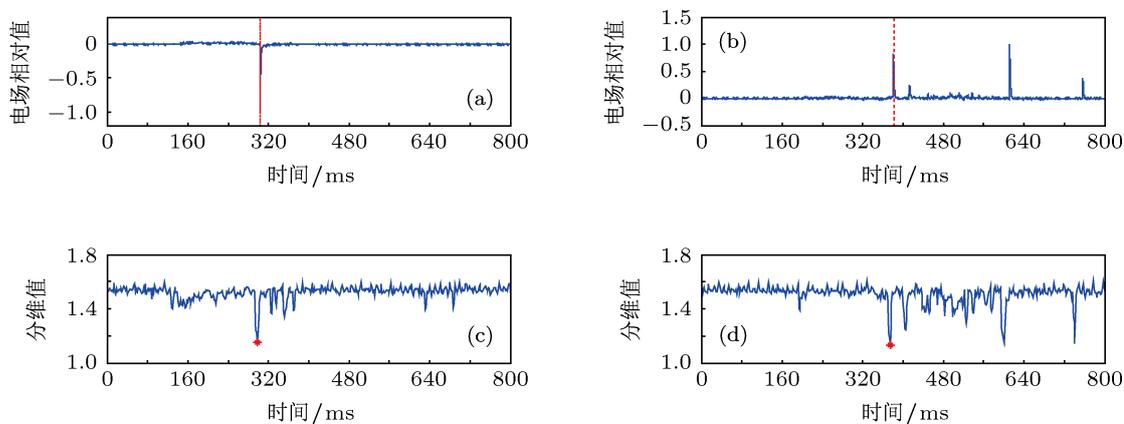


图7 地闪信号的回击点检测图 (a) 正地闪 164522; (b) 负地闪 141937; (c) 正地闪辐射场信号分维数轨迹图; (d) 负地闪辐射场信号分维数轨迹图

5 结果与讨论

本文对闪电辐射场信号的分形特征进行了深入研究和分析, 并利用支持向量机技术将闪电分形特征应用于闪电不同放电类型的识别及地闪回击点检测中, 得到以下几点分析结论:

1. 闪电辐射场信号的分形维数大致分布于 1.25—1.7 之间, 基本符合正态分布. 地闪辐射场信号的分形维数与云闪辐射场信号的分形维数有明

显的差别, 云闪的分形维数值要大于地闪的分形维数值. 地闪辐射场的平均分形维数为 1.4, 云闪辐射场的平均分形维数为 1.5, 云闪辐射场信号比地闪辐射场信号要复杂.

2. 将闪电辐射场信号分形维数的最小值、平均值、峰度、标准差、极差五个特征值作为信号特征, 利用支持向量机技术对地闪和云闪两种不同的闪电放电类型进行了识别, 有效识别率达到 95% 以上.

3. 通过构造地闪辐射场信号分形维数轨迹图, 将闪电时间序列信号的各成分特性有效的区别开来, 结果表明分形维数最低点对应于原时间序列中的回击位置, 利用分形维数轨迹中的最低点的位置即可快速准确地检测到地闪辐射场信号的回击点, 检测率可达到 100%.

本文仅对一定距离范围内单站闪电观测资料进行了分析, 今后的工作中需要结合多站电场同步定位的结果, 考虑测站的距离、场地等因素, 对闪电放电过程的物理机制进行更为全面、详细的讨论. 尽管如此, 本文中对辐射场信号的分形维数计

算值和已有研究资料中的结果基本相符, 一定程度上证明了本文工作的合理性, 并开拓性的将闪电分形特征作为闪电辐射场信号一个较为平稳的特征应用到云闪和地闪的识别以及地闪回击点的检测中, 取得了比较理想的结果. 所得结论对闪电信号的自动化识别和检测具有一定的指导意义和参考价值, 也为闪电信号处理与防护技术的发展带来了新的思路.

感谢 2009—2011 年青海大通雷电观测实验的全体人员的支持, 感谢青海省气象局人影办以及大通县人影办在野外实验中给予的支持.

- [1] Cao D J, Qie X S, Duan S, Xuan Y J, Wang D F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069202 (in Chinese) [曹冬杰, 鄒秀书, 段树, 宣越建, 王东方 2012 物理学报 **61** 069202]
- [2] Zhao X Y, Yuan P, Wang J, Shen X Z, Guo Y X, Qiao H Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3243 (in Chinese) [赵学燕, 袁萍, 王杰, 申晓志, 郭逸潇, 乔红贞 2009 物理学报 **58** 3243]
- [3] Zhao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese) [赵阳, 鄒秀书, 孔祥贞, 张广庶, 张彤, 杨静, 冯桂力, 张其林, 王东方 2009 物理学报 **58** 6616]
- [4] Mandelbrot B B 1982 *The Fractal Geometry of Nature* (New York:Freeman) p28
- [5] Deng Y, Shi W K, Liu Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 759 (in Chinese) [邓勇, 施文康, 刘棋 2002 物理学报 **51** 759]
- [6] Tsionis A A, Elsner J B 1987 *Beitr Phys. Atmos.* **60** 187
- [7] Vecchi G, Labate D, Canavero F 1994 *Radio Sci.* **29** 694
- [8] Ren S P, Chi J P, Zhang H C, Liu L C 1999 *Power System Technology* **23** 11 (in Chinese) [任顺平, 迟建平, 庄洪春, 刘来存 1999 电网技术 **23** 11]
- [9] Gou X Q, Zhang Y J, Dong W S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 957 (in Chinese) [苟学强, 张义军, 董万胜 2006 物理学报 **55** 957]
- [10] Gou X Q, Zhang Y J, Dong W S, Qie X S 2007 *Chinese J. Geophys.* **50** 101 (in Chinese) [苟学强, 张义军, 董万胜, 鄒秀书 2007 地球物理学报 **50** 101]
- [11] Gou X Q, Chen M L, Zhang Y J, Dong W S, Qie X S 2008 *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* **44** 24 (in Chinese) [苟学强, 陈明理, 张义军, 董万胜, 鄒秀书 2008 兰州大学学报 (自然科学版) **44** 24]
- [12] Krider E P, Noggle R C, Uman M A 1976 *Appl. Meteor* **15** 301
- [13] Weidman C D, Krider E P 1979 *J. Geophys. Res.* **84** 3159
- [14] Detect and Locate Lightning Events from Geostationary Satellite Observations (Report Part: Review of existing lightning location systems) Finke U, Kreyer O http://www.eumetsat.int/groups/pps/documents/document/pdf_mtg_rep05.pdf [2002-9]
- [15] Massey R S, Eack K B, Eberle M H, Shao X M, Smith D A 1999 *the 11th international conference on atmospheric electricity* Guntersville, AL (United States), Jun 7-11 1999 p684
- [16] Smith D A, Eack K B, Harlin J 2002 *J. Geophys. Res.* **13** 4183
- [17] Shao X M, Mark Stanley, Amy Regan 2006 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **23** 1273
- [18] Murphy M J, Cummins K L, Albut E P 2003 *United States Patent*, pub. No: US 2003/0151397 A1
- [19] Liu H Y, Dong W S, Wang T, Qiu S 2009 *Meteorological Monthly* **35** 49 (in Chinese) [刘恒毅, 董万胜, 王涛, 邱实 2009 气象 **35** 49]
- [20] Li P, Zheng Y, Zhang Y J 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1512 (in Chinese) [李鹏, 郑毅, 张义军 2007 强激光与粒子束 **19** 1512]
- [21] Xiang Z, Liu M, Li P, Zheng Y, Fan J B 2011 *Opto-Electronic Engineering* **38** 28 (in Chinese) [项震, 刘明, 李鹏, 郑毅, 范江兵 2011 光电工程 **38** 28]
- [22] Falconer K J 1990 *Fractal Geometry: Mathematical Foundation and Application* (New York: John Wiley and Sons) p86
- [23] Vapnik V N 1995 *The nature of statistical learning* (New York: Springer-Verlag) p235
- [24] Cristianini N, Taylor J *An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods* (New York:Cambridge University Press) p78

Fractal characteristics research of lightning and its application to automatic recognition*

Huo Yuan-Lian^{1)2)†} Zhang Guang-Shu¹⁾ Lü Shi-Hua¹⁾ Yuan Ping²⁾

1) (*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

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

(Received 1 August 2012; revised manuscript received 10 September 2012)

Abstract

By analyzing the fractal feature of 120 cloud-to-ground lightning signals and 77 intracloud lightning signals obtained by the fast antenna system in Qinghai area during the summer of 2009, the results show fractal dimension of cloud-to-ground lightning signal is obviously different from that of intracloud lightning signal. Then 5 characteristic values of fractal dimension are used to recognize the discharge types of lightning signal via support vector machine, and the recognition rate is higher than 95%. The construction of cloud-to-ground lightning time series signal fractal dimension trajectory map shows that the fractal dimension minimum value corresponds to the return stroke of the original time series signal, which can be used to quickly and accurately detect the return stroke of lightning signal, and the detection rate can reach 100%. The fractal dimension is a discriminatively physical property which can be used for intelligently analyzing and automatically processing the lightning signal.

Keywords: lightning signal, fractal dimension, support vector machine, automatic recognition

PACS: 92.60.Pw, 64.60.al

DOI: 10.7498/aps.62.059201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41075002, 40775004), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41030960), and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY201006005-03).

† Corresponding author. E-mail: huoyuanlian@163.com