

基于 DBSCAN 聚类算法的闪电临近预报模型

侯荣涛^{1,2}, 朱斌^{1,2*}, 冯民学³, 史鑫明^{1,2}, 路郁^{1,2}

(1. 南京信息工程大学 江苏省网络监控中心, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 计算机与软件学院, 南京 210044; 3. 江苏省防雷中心, 南京 210009)

(* 通信作者电子邮箱 binzhu1987@163.com)

摘要:针对闪电定位仪中庞大而杂乱的定位数据,提出一种基于改进 DBSCAN 聚类算法(IDBSCAN)进行闪电聚类分析的方法。该方法依据闪电定位系统中的实时监控数据,搜索闪电密度大于阈值范围的地闪点,建立密度可达最大值的闪电聚类簇,并找到该簇类中的核心地闪点。同时,应用邻接表结构对 DBSCAN 算法进行改进,使得初始地闪数据的搜索集的建立时间和空间得到大大减少。在聚类分析结果基础上,对核心地闪点的移动路径进行拟合,从而预报下一时刻的核心地闪点位置。实验证明,将 IDBSCAN 算法应用在闪电临近预报中是有效的。

关键词:闪电临近预报;定位资料;DBSCAN 算法;邻接表;空间聚类

中图分类号: P446; TP311.1 **文献标志码:** A

Prediction model for lightning nowcasting based on DBSCAN

HOU Rong-tao^{1,2}, ZHU Bin^{1,2*}, FENG Min-xue³, SHI Xin-ming^{1,2}, LU Yu^{1,2}

(1. Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China;

2. College of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China;

3. Lightning Protection Center of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu 210009, China)

Abstract: Against the massive monitoring data of lightning locating system, a lightning nowcasting model based on Improved Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise (IDBSCAN) clustering algorithm was put forward. Based on the lightning location data in real-time monitoring system, this method searched for lightning-density flash point greater than the threshold value of the land, built the cluster with up to the maximum ground flash density, and located the core of the cluster. Besides, with the application of adjacency list search algorithm, time and space consumed for the initial search set of lightning data had been greatly reduced. Furthermore, using regression fitting algorithm, the proposed algorithm can predict the path of movement of lightning cluster. The experimental results show that IDBSCAN algorithm used in the lightning nowcasting is effective.

Key words: lightning nowcasting; location information; DBSCAN algorithm; adjacency list; spatial clustering

0 引言

近几年来,在气象工作者的努力下我国建立了闪电监测网络系统,以江苏省为例,它包含 3~5 个电场仪,覆盖全省的 9 个闪电定位观测点和 1~2 个自动气象观测站,监测系统实时记录地闪数据的时间、空间坐标、强度、区域等信息。但是,这些闪电的发生和发展并不是随机现象,它们往往随着云层、气流的移动而移动。如果利用空间聚类及移动轨迹拟合的方法,分析闪电的形成、时空分布表现及未来发展趋势,将为雷电的临近预报提供科学依据。

在先验知识的情况下,聚类分析^[1]技术是解决上述问题的首选。聚类分析可以根据样本相似度对数据进行分组,发现对象空间的分布特征。迄今为止,人们已经提出了许多聚类算法,如 K-Means、CLARANS、DBSCAN、CURE、CLIQUE 等聚类算法^[2],其中 DBSCAN 算法是一种基于密度的聚类算法^[3]。本文提出一种基于改进 DBSCAN 聚类(Improved

DBSCAN, IDBSCAN)算法的闪电临近预报模型,主要针对区域内的闪电监测数据进行聚类分析和回归预测。系统中,以 2010 年 08 月 15 日 13:20—13:40 浦口区 and 南京市辖区发生的强雷暴天气为例,应用基于 IDBSCAN 聚类算法的闪电临近预报模型,对局部雷电进行聚类分析,并进行短时雷电预报。经验证,该方法能够在雷暴天气较为准确地反映出短时雷电的变化趋势,达到良好的闪电移动趋势预报^[4]效果。

1 闪电观测数据特征分析

雷电现象具有随机性、集中性、破坏性等特征,特别是在夏季,雷电现象更是频繁而猛烈,其产生的闪电定位资料数据也非常庞大,南京市 2010 年 8 月份闪电事件共计约 12 000 次,图 1 为雷电月变化特征图。现有的空间聚类算法大多依据空间实体间的距离和邻近域内实体数目进行聚类,没有顾及空间实体邻近域内实体的局部分布情况。而在强对流天气,某个时间段的闪电将分布于比较广泛的地域上,这不利于

收稿日期:2011-08-22;修回日期:2011-12-12。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875175);天津市自然科学基金资助项目(10JCZDJC23400);江苏高校优势学科建设工程项目。

作者简介:侯荣涛(1957-),男,河北唐山人,教授,博士生导师,主要研究方向:混沌信息识别、特征提取、机器视觉、信号处理;朱斌(1987-),男,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向:信息安全、气象信息处理、数据挖掘;冯民学(1962-),男,江苏无锡人,正研级高级工程师,博士,主要研究方向:雷电监测与防护;史鑫明(1988-),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要研究方向:数据挖掘、人工智能;路郁(1988-),男,江苏苏州人,硕士研究生,主要研究方向:数据挖掘。

气象观测员对局部地区的闪电趋势精确预测。如果将局部观测区域按等时间段进行分割,然后再对各时间段的闪电进行地理位置聚类分析,这样将有助于观测员更加细致地对地闪进行临近预报。

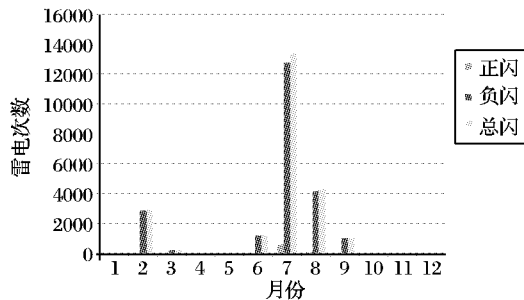


图 1 南京市 2010 年雷电月变化特征

一般情况下,闪电密度定义为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬度范围内闪电次数。但是,本文根据实际天气尺度大小,将闪电频率作为判断依据。闪电频率则定义为 5 min 时间段内 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 范围中的闪电次数(单位:次/ $(0.5^\circ \times 0.5^\circ)$)。故在强雷暴天气中,为了加快分析某局部区域的闪电趋势的效率,一般需要该区域经纬度 0.5° 变化范围内的闪电空间坐标数据,暂时消除无用的属性数据,包括陡度、误差、定位方式等^[5]。在确定地理变化范围后,还要对该地理范围的闪电按间隔 a 进行等时段分割。强对流天气尺度下,局部区域 5 min 间隔的闪电将近 100 条,将预处理后的闪电属性数据分别存入队列。

2 闪电空间聚类分析

2.1 聚类及 DBSCAN 算法

聚类是一项发现数据的分布规律和隐含关系的关键数据挖掘技术。所谓聚类,就是把大量的 d 维数据样本 (n 个) 聚集成 k 类 (k, n),使同一类中的样本的相似性最大,而不同类中的样本的相似性最小。DBSCAN 是一种基于高密度连通区域的聚类算法。该算法将具有足够高密度的区域划分为簇,并在具有噪声的空间数据库中发现任意形状的簇。它将簇定义为密度相连的点的最大集合。

2.2 基于聚类的闪电数据分析

基于 DBSCAN 聚类方法的闪电数据分析的主要思想是:对强雷暴天气尺度下,局部地区的闪电随时间变化而变化,在给定的地闪半径 ε 范围之内(单位:km)的地闪个数必须不小于给定的阈值 $MinPts$,即邻域的密度必须不小于某个阈值。所以该时段内的集中地闪簇^[6]为半径 ε 内发生 $MinPts$ 以上地闪的集合。下面是算法中涉及的一些定义^[7]:

- 1) 如果对象的 ε -领域至少包含最小数目 $MinPts$ 的对象,则称该对象是核心地闪点。
- 2) 给定一个对象集合 D ,如果 p 是在 q 的 ε -领域内,而 q 是一个核心对象,则称对象 p 从对象 q 出发是直接密度可达的。
- 3) 如果存在一个对象链 $p_1, p_2, \dots, p_n, p_1 = q, p_n = p$, 对于 $p_i \in D (1 \leq i \leq n)$, $p_i + 1$ 是从 ε 关于 p_i 和 $MinPts$ 直接密度可达的,则称对象 p 从对象 q 关于 ε 和 $MinPts$ 密度可达 (density-reachable),这种关系是非对称关系。
- 4) 如果对象集合 D 中存在一个对象 o ,使得对象 p 和 q 是从 o 关于 ε 和 $MinPts$ 密度可达的,对象 p 和 q 关于 ε 和 $MinPts$ 密度相连 (density-connected),这种关系是对称关系。
- 5) 基于密度可达的最大密度相连对象的集合称为地闪

簇。不属于任何簇的对象被认为是噪声点。

2.3 DBSCAN 算法改进研究

传统 DBSCAN 算法虽然聚类速度快,效率高,但是应用到闪电趋势预报中时,则具有以下几个较明显的缺点:

- 1) 决定密度的阈值参数 ε 和 $MinPts$ 是全局唯一的,所以,DBSCAN 只能发现密度近似的簇。
- 2) 在进行分时地闪聚类前,需要事先建立所有数据的 R^* -树^[8],耗时且实现繁琐。
- 3) 不同的实际天气尺度中,对应的闪电频率也会不同,其聚类的结果可能有若干核心点。但是气象观测员只需要该局部区域内的密度相对较大的核心地闪点,来预报下一个核心点。

本文针对第 1 个缺点,在实际雷暴天气尺度应用中,根据天气尺度的不同,设定相应的 ε 和 $MinPts$ 聚类阈值。其中主要分为一般雷暴和强雷暴天气两种情况,二者区别在于闪电频率有所不同。若闪电频率 < 10 ,则视为一般雷暴天气, ε -领域半径 ≥ 10 ;若闪电频率 ≥ 10 ,则视为强雷暴天气, ε -领域半径 ≤ 8 。另外,由于某个时间段内地图上存在大量的噪声地闪点,本文算法将过滤超出空间范围内的地闪数据,因此数据量大大减少。

针对第 2 个缺点,本文提出采用邻接表数据结构来代替 R^* -树的方法。通常,DBSCAN 算法在构建 R^* -搜索树时,其时间复杂度及算法总的时间复杂度 ($O(n \log n)$) 与地闪数据量呈非线性关系^[9]。通常闪电临近预报是对某区域的闪电进行聚类,而算法以 ε 范围内至少有 $MinPts$ 起地闪事件的原则进行搜索,因此只需关心每个地闪点邻近的 ε 范围内的地闪情况,地闪点集邻域中的地闪存在着相邻关系。因此,本文提出一种采用图论^[10] 中的邻接表来代替 R^* -树的 DBSCAN 算法。邻接表数据结构简单直观,且占用内存较少,如图 2 所示。基表及其链表共同组成一个邻接表,基表表示该时段内按时间顺序所有的地闪数组 p_i ,而其后的链表表示 p_i 阈值 ε 范围内的所有地闪。例如,图 2 中的第 2 行的第 1 个元素代表第 2 起地闪事件 p_2 (包含 ID、经度、纬度等信息),而该地闪在阈值 ε 范围内有 p_3, p_2, p_1 这 3 起地闪事件。

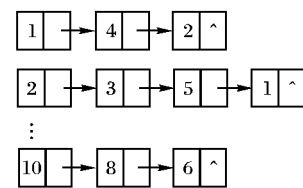


图 2 地闪数据邻接表

最后根据现实生活中不同的天气尺度,及时调整 ε 和 $MinPts$ 聚类参数^[11],得到该局部区域内的密度相对较大的核心地闪点 p_{max} 。IDBSCAN 算法具有一定的科学性和合理性,能够改善其聚类及预报效果。

2.4 算法描述

第 1 步 对地闪数据进行预处理,建立地闪属性数据集 O ,并为其增加聚类结果字段 ID (整型),聚类结果 ID 初始值为零;定义地闪数据的搜索集 S ,临时检索结果存放于 S 中^[12];最后,设定阈值参数 $MinPts$ 和 ε 。

第 2 步 遍历 O ,依次搜索每个地闪点的 ε -领域,并为该点建立邻接表存储领域内所有地闪数据点。

第 3 步 遍历 O ,依次将每个地闪点作为初始种子点^[13] 进行考察,具体如下步骤:

1) 对于地闪点 p_i , 如果 ID 为零, 则搜索其邻接表; 如果邻接表链表中地闪事件数目超过 $MinPts$, 则点 p_i 为核心地闪点, 将其 ID 设置为 $cluster$, 同时将 p_i 的邻接表链表包含的所有地闪存入 S 中。

2) 遍历 S , 将每个地闪点作为种子点进行考察, 对于点 q_i , 如果 ID 为零, 搜索其邻接表, 如果邻接表链表中邻域地闪数目超过 $MinPts$, 则 q_i 也是个核心点, 同时它是点 p_i 的直接密度可达点, 与 p_i 属于同一类, 将 q_i 的 ID 设置为 $cluster$; 否则 q_i 为边界点, 但 q_i 的 ID 也设为 $cluster$ 。如果 q_i 是核心地闪点, 点 o 存在于 q_i 邻接表链表中并且 o 不属于 S , 则将点 o 存入 S 中。最后将点 q_i 从 S 中删除。

3) 搜索 S 中的下一个地闪点, 若 S 非空, 则执行 2)。

第 4 步 考察地闪数据集 O 中的下一个点, 并将 $cluster$ 加 1, 执行第 2 步, 直至遍历完数据集。

第 5 步 删除地闪搜索集 S 。

第 6 步 遍历邻接表中邻域地闪数目最多的点 p_{max} (核心地闪点), 利用最小二乘多项式^[14] 对各时段 p_{max} 点进行曲线拟合。

至此, IDBSCAN 算法对地闪数据集仅搜索一次即可得到最终聚类结果, 并通过曲线拟合能够准确得到闪电簇的移动路径, 从而预测闪电在下一时段的集中区域。地闪属性数据集 O 中记录了聚类结果, 其中, 邻接表中邻域地闪数目最多的点为该时段的核心地闪点 p_{max} , 字段 ID 值为零的点为噪声点。IDBSCAN 算法的流程如图 3 所示。

3 实验及结果分析

3.1 实验数据采集及处理

实验采用 CPU 1.7 GHz, 512 MB 内存的计算机, 软件平台为 SQL Server 2005, 开发工具为 .Net 和 ArcGIS 9.2。采集江

苏省南京市浦口区及市辖区在 2010 年 8 月 15 日 13:20—13:40 发生的强雷暴数据进行实验分析, 选取经度变化范围为 118.35°到 118.6°, 纬度变化范围为 31.94°到 32.06°, 该时段总计发生 112 条, 平均强度 29.21 kA, 时间间隔为 5 min。其闪电统计信息如表 1 所示。

表 1 等间隔闪电统计信息

编号	开始时间	结束时间	总闪次数	平均强度/kA
1	2010-08-15T13:20	2010-08-15T13:25	9	27.35
2	2010-08-15T13:25	2010-08-15T13:30	16	28.05
3	2010-08-15T13:30	2010-08-15T13:35	31	29.35
4	2010-08-15T13:35	2010-08-15T13:40	56	32.10

3.2 闪电空间聚类

本文应用提出的基于 IDBSCAN 聚类算法的闪电临近预报模型进行空间聚类, 其参数选取如下: $\epsilon = 8$ km, 即经度距离约 0.08°, $MinPts = 2$ 。2010 年 8 月 15 日 13:20—13:40 南京地区的等间隔聚类分析结果如图 4 所示, 其中“+”代表正闪, “-”代表负闪。

从聚类结果图 4(a) 可看出: 起始时刻地闪进入浦口北部边界地区, 形成 2 个核心闪电簇, 分别不同的颜色标识, 并且聚类簇的核心地闪点以★标记出来; 图 4(b) 中的 2 个闪电簇说明闪电已集中落于浦口区, 经过 5 min 的演变, 图 4(c) 中的 2 个闪电簇渐渐向东偏南移动, 并向长江对岸的雨花区移动; 图 4(d) 中显示闪电的频率和强度迅速提高, 继续向南移, 由聚类算法及设定的参数, 系统已形成 3 个核心闪电簇。在聚类过程上, 记录各时段的闪电簇的类别、个数、核心点位置等重要数据, 构成核心地闪时空序列, 如表 2 所示。

3.3 聚类结果分析及预测

在闪电聚类预处理的基础之上, 本模型提出利用最小二

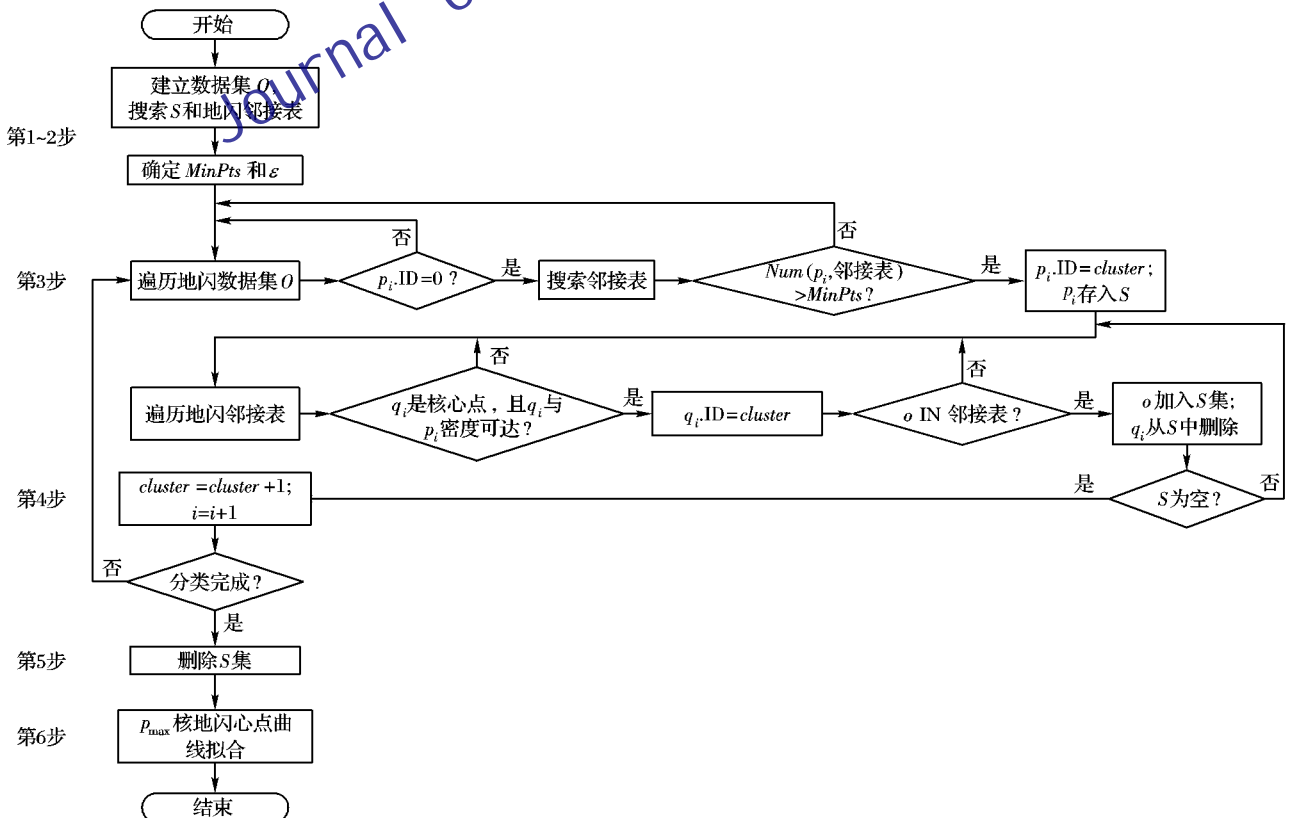


图 3 IDBSCAN 算法流程

乘法构造一个多项式函数 $y = F(x)$, 对核心闪电时空序列进行曲线拟合。选取各时段的核心闪电地点 p_{max} (经度, 纬度) 为拟合点, 构造二次多项式近似曲线为:

$$y = -1.51856x^2 + 360.1295x - 21319.3652$$

由此曲线来模拟闪电移动路径, 如图5所示。根据拟合曲

线对下一时刻的核心闪电进行预测, 其预测空间坐标是 (118.531, 31.987), 地图上的▲标记。根据事后对 13:40 的地闪数据进行聚类分析得到相似的结果, 其核心闪电 (118.571, 32.021) 和预测区域距离仅相差 4.48 km, 起到了良好的闪电临近预报效果。

表2 各时段核心闪电空间序列

编号	开始时间	结束时间	核心类1 (次, 经度, 纬度)	核心类2 (个数, 经度, 纬度)	核心类3 (个数, 经度, 纬度)	噪声点 次数
1	2010-08-15T13:20	2010-08-15T13:25	(4, 118.425, 31.962)	(3, 118.360, 31.972)	无	1
2	2010-08-15T13:25	2010-08-15T13:30	(10, 118.46, 31.978)	(4, 118.421, 32.976)	无	2
3	2010-08-25T13:30	2010-08-15T13:35	(20, 118.478, 31.981)	(8, 118.430, 32.971)	无	3
4	2010-08-15T13:35	2010-08-15T13:40	(34, 118.512, 31.991)	(12, 118.445, 32.976)	(6, 118.455, 32.016)	4

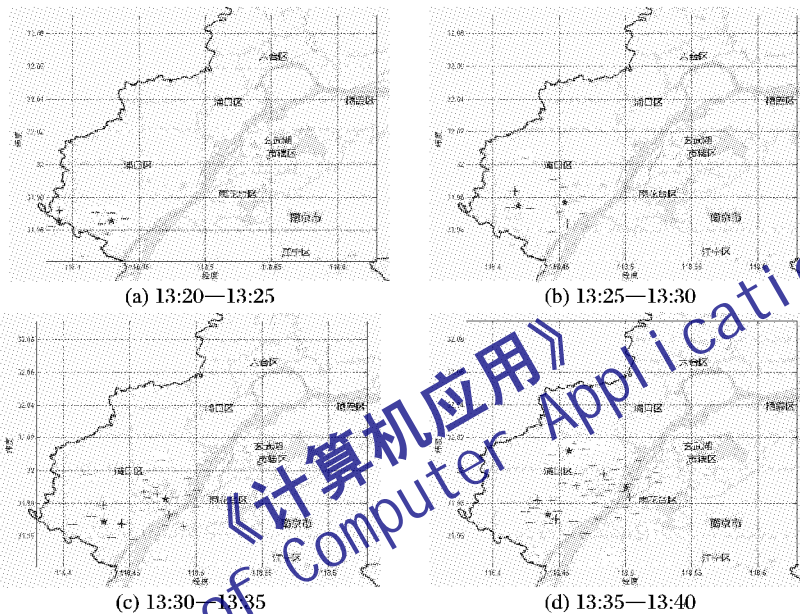


图4 13:20—13:40 地闪各时段聚类结果



图5 闪电路径拟合及落点预测

根据以上临近预报模型对短时闪电数据的处理及分析结果, 雷暴监测人员可以得出该时空的地闪分布特征为: 1) 地闪频率逐渐增大, 可能会发生强雷暴天气; 2) 随着强对流天气的发生和发展, 各时段内地闪的地理位置在逐渐向东偏南方向移动; 3) 根据图5闪电路径曲线拟合结果所示, 可以准确、科学预测 13:40 左右将在南京市上空发生强雷暴天气。实验再次证明, 将 IDBSCAN 算法应用在闪电临近预报中是十分有效的。

3.4 算法性能比较

由于本模型应用于短时闪电预报系统, 对预报的准确率、及时性都有要求, 因此, 本文采用基于邻接表数据结构的 IDBSCAN 算法, 优化传统算法中复杂的 R* 树建立过程, 节省大量的空间资源及时间。本实验对两种算法的时间及准确

性进行比较, IDBSCAN 算法较传统算法都有所提高, 时间比较结果如图6所示, 准确率对比如表3所示。

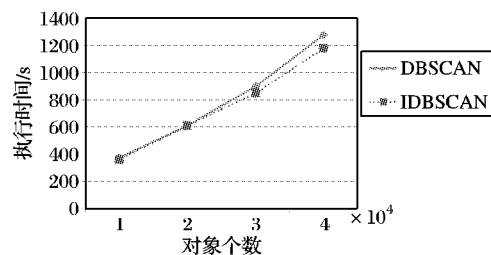


图6 改进算法与传统算法时间比较

表3 IDBSCAN 与 DBSCAN 准确率比较

算法	抽取闪电数	正确聚类数	准确率/%
DBSCAN	112	99	88
IDBSCAN	112	102	91

4 结语

本文针对强雷暴天气尺度进行闪电临近预报, 利用 IDBSCAN 算法进行空间聚类分析, 研究了基于该算法的短时闪电临近预报系统。该系统对每个间隔内的闪电簇的核心点进行时间和空间分析, 以此来预测下一阶段闪电的落点位置。针对气象产品的及时性、准确性、形象化等需求, 系统对闪电

定位资料进行采集、存储、分析等3个模块处理,各模块具有独立和并行处理的特点。系统的核心模块是空间聚类分析模块,它将数据库中的闪电数据进行等时间间隔划分,并应用 IDBSCAN 空间聚类算法进行闪电临近预报。实验结果证明, IDBSCAN 算法对闪电进行空间分布和临近预报起到良好效果。但本系统模型目前只针对强雷暴及强对流天气的情形,其他情形将在后续开发工作做进一步研究。

参考文献:

- [1] HAND D, MANNILA H, SMYTH P. Principles of data mining [M] 影印版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 周水庚, 周傲英, 曹晶, 等. 一种基于密度的快速聚类算法[J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(11): 1187-1192.
- [3] 陈燕, 耿国华, 郑建国. 一种改进的基于密度的聚类算法[J]. 微机发展, 2005, 15(3): 84-89.
- [4] 李霞, 汪庆森, 巩晴霞, 等. 苏州地区雷电分布规律分析[J]. 气象科技, 2006, 26(4): 443-449.
- [5] 李照荣, 张强, 陈添宇, 等. 一次强冰雹暴雨天气过程闪电特征分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(3): 321-327.
- [6] 刘卫宁, 曾婵娟, 孙隽华. 基于 DBSCAN 算法的营运车辆超速点聚类分析[J]. 计算机工程, 2009, 35(5): 268-270.
- [7] CHEN YAN-HUA, MANJEET REGE, DONG MING, *et al.* Non-negative matrix factorization for semi-supervised data clustering[J]. Knowledge and Information Systems, 2008, 17(3): 355-379.
- [8] TSAI CHENG-FA, YE HENG-FU, CHANG JUI-FANG, *et al.* An efficient data clustering scheme using partition space technique

- for knowledge discovery in large databases[J]. Applied Intelligence, 2010, 33(1): 39-53.
- [9] WU YI-PU, GUO JIN-JIANG, ZHANG XUE-JIE. A linear DBSCAN algorithm based on LSH[C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 2608-2614.
- [10] MARTIN E. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Portland, USA: AAAI Press, 1996: 226-231.
- [11] MARZENA K R Y, PIOTR L A. TI-DBSCAN: Clustering with DBSCAN by means of the triangle inequality[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Rough Sets and Current Trends in Computing. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 60-69.
- [12] DERYA BIRANT, ALP KU. ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial-temporal data[J]. Data & Knowledge Engineering, 2007, 60(1): 208-221.
- [13] BORAH B, BHATTACHARYYA D K. An improved sampling-based DBSCAN for large spatial databases[C]// Proceedings of Intelligent Sensing and Information Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 92-96.
- [14] PEI JIAN, HAN JIA-WEI, MORTAZAVI-ASL B. PrefixSpan: Mining sequential patterns by prefix-projected growth[C]// Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Data Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001: 215-224.

(上接第 842 页)

能够在 Q 值更低(体征状况较好)的情况下,更有效地延长系统的工作寿命。

5 结语

基于 UWB 体域网和异构的生理传感器,本文设计了一种可获得多种生理信息的无线体征监测系统,并提出了一种基于体征状态机的低功耗调度方法,以便对人体的健康与安全进行长期监测。建议的调度方法利用体征状态机减少了不必要的传感器工作和无线传输的数据量,从而提高了能量的使用效率,延长了整个监测系统的工作寿命。

参考文献:

- [1] PANTELOPOULOS A, BOURBAKIS N G. A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part C: Applications and Reviews, 2010, 40(1): 1-12.
- [2] 吴怡之, 丁永生, 许红安, 等. 体域医学传感器网络的设计及其 QoS 性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(14): 124-126.
- [3] PANTELOPOULOS A, BOURBAKIS N G. Prognosis — A wearable health monitoring system for people at risk: methodology and modeling[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2010, 14(3): 613-621.
- [4] CHEN S L, LEE H Y, CHEN C A, *et al.* Wireless body sensor network with adaptive low-power design for biometrics and healthcare applications[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(4): 398-409.
- [5] 秦晓华, 段俊杰, 袁克虹, 等. 一种老年人移动健康监护系统的研

- 究[J]. 中国医学物理学杂志, 2011, 28(1): 2407-2410.
- [6] CORCHADO J M, BAJO J, TAPIA D I, *et al.* Using heterogeneous wireless sensor networks in a telemonitoring system for healthcare[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2010, 14(2): 234-240.
- [7] CAO H, LEUNG V, CHOW C, *et al.* Enabling technologies for wireless body area networks: a survey and outlook[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 84-93.
- [8] CHEN M, GONZALEZ S, VASILAKOS A, *et al.* Body area networks: a survey[J]. Mobile Networks & Applications, 2011, 16(2): 171-193.
- [9] HÄMÄLÄINEN M, TAPARUGSSANAGORN A, TESI R, *et al.* Wireless medical communications using UWB[C]// ICUWB 2009: IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 485-489.
- [10] HE Y F, ZHU W W, GUAN L. Optimal resource allocation for pervasive health monitoring systems with body sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(11): 1558-1575.
- [11] OMENI O, WONG A C W, BURDETT A J, *et al.* Energy efficient medium access protocol for wireless medical body area sensor networks[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2008, 2(4): 251-259.
- [12] GHASEMZADEH H, JAFARI R. A greedy buffer allocation algorithm for power-aware communication in body sensor networks[C]// CODES/ISSS'10: Proceedings of the 8th IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 195-204.