文章编号:1671-8860(2010)07-0833-04　　**文献标志码**:A

基于聚类分析的卫星雷达测高波形分类研究

汪海洪[1,2]　岳迎春[3]　邹贤才[1]　杨元德[1]

(1　武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2　海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室,青岛市前湾港路 579 号,266510)
(3　中国地质大学信息工程学院,武汉市鲁磨路 388 号,430074)

摘　要:验证了聚类分析用于卫星雷达测高波形分类的可行性。针对雷达测高波形的特征,提出了移动最小欧氏距离算法,并以该距离作为相似性统计量进行聚类分析,取得了很好的效果。以 Topex/Poseidon 卫星的近岸波形为例,比较了最短距离法、最长距离法、类平均法和最小方差法等 4 种聚类方法的聚类效果,结果表明最小方差法效果最优。

关键词:雷达测高;波形;分类;聚类分析
中图法分类号:P228.41; P228.3

回波波形是卫星雷达测高的原始观测数据,目前已被广泛用于改善近海或非海洋表面测高数据的质量[1-4],即通过对测高波形进行重跟踪,更精确地计算出雷达脉冲的往返时间,进而改正地球物理数据记录(GDR)中的距离观测值。波形重跟踪的方法很多,但每种方法都有其适用性,只能提高在某些测高环境下的测高精度,这是因为不同性质的反射面会产生不同的回波波形。因此,要最大限度地提高测高数据质量,必须根据波形形状选择合适的重跟踪算法。基于这一目标,Berry 等人曾开发了一个专家系统用于陆地测高波形数据的处理[3]。对波形进行准确地分类与识别是实现该目标的关键。此外,由于波形形状与反射面的性质直接相关,故波形分类还可用于研究地球表面的散射特性、粗糙度及覆盖物等性质。

雷达测高波形的分类一直没有较好的方法。最简单的做法是根据重心偏移法(OCOG)计算得到的几个参数(重心位置、宽度、振幅、前缘中点位置)来进行分类,但这种方法只能简单识别海洋波形和非海洋波形,不能对复杂的非海洋波形进行分类。Lee 等人根据镜面反射特性和波形的能量分布特征给出了一种区分镜面反射波形与准散射波形的算法[4]。Dabo-Niang 等人基于非参数函数数据分析理论提出利用模型曲线进行波形分类的方法[5],将波形分类方法研究推进了一步,但从实验结果来看该方法仍有待改善。聚类分析是进行数据分类的一种常用方法,广泛用于研究生物学、医学和化学等众多领域中的分类问题。近年来,许多学者将其用于测绘数据处理,得到了较好的效果[6,7]。本文将研究利用聚类分析方法进行雷达测高波形分类的可行性。

1　测高波形

测高波形是雷达回波功率随时间变化的曲线,由测高仪的自动增益装置在设定的时间范围内对回波功率进行多次采样得到。根据测高仪的工作原理,测高波形一般可分为热噪声、上升区和下降区 3 个部分。上升区回波功率逐渐增大,称为波形的前缘;下降区功率逐渐衰减,称为后缘。前缘中点是与海面高度相关的量,波形重跟踪就是要根据波形重新确定前缘中点的位置,以获取精确的距离观测值。有关测高波形的详细描述及其产生的基本原理,可参阅文献[8]。

测高波形简单地可分为海洋波形和非海洋波形。海洋波形主要在开阔海洋表面上形成,形状比较规则,可用一个函数模型来表示,是卫星测高最初设计的标准波形。不同于海洋波形的均称为

收稿日期:2010-05-15。
项目来源:国家自然科学基金资助项目(40704003);山东科技大学海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室资助项目(2009B04)。

非海洋波形，主要来自冰面、海冰混合区、陆地、近岸等非开阔海洋表面。由于反射面性质各异，非海洋波形的形态也就非常复杂。例如，冰面上主要是镜面反射，因此波形表现为前缘和后缘都极陡的尖峰状。在近海区域，有的波形接近海洋波形，有的波形则受到海岸或岛屿反射信号的影响而产生严重变形。以 Topex/Poseidon（T/P）卫星为例，图1给出了穿过台湾海峡的第38周164号降弧上的16个近岸波形样本，这些样本显示了近海区域的测高波形非常复杂。从这16个样本的形状看，可以分为以下4类：① 海洋型（如波形13、14），这类波形具有较陡的前缘，但后缘下降速度缓慢；② 尖峰型（如波形15、16），波形的前缘和后缘都非常陡，波形宽度极窄，形状像一根针刺，这类波形是由镜面反射形成的；③ 宽峰型（如波形1、2），相比尖峰波形这类波形有更长的后缘以及更宽的波峰，而且在后缘上还有一些小的污染，可能是因为观测区域内有小的岛屿；④ 双峰或多峰型（如波形7、8），具有两个或多个明显的波峰。

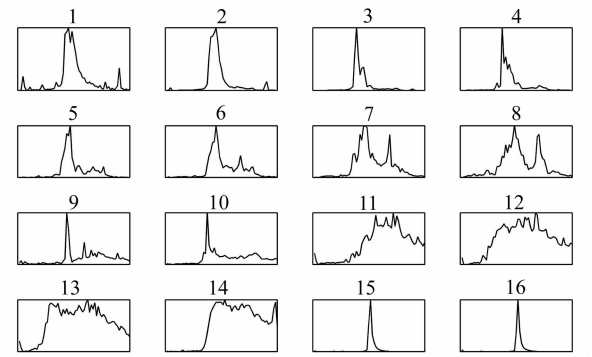

图1 雷达波形样本

Fig. 1 Radar Waveform Samples

2 聚类分析

聚类分析是对样本进行分类的一种多元统计分析方法，其目的是在事物类别未知的情况下把研究对象按照一定的规则分成若干类，类的数目和结构根据观测数据的特征来确定。系统聚类法是目前国内外最常使用的一种聚类方法，其基本思想是：先将每个样本各自看成一类，然后确定类与类之间的相似性统计量，并选择最接近的两类或若干个类合并成一个新类，计算新类与其他各类之间的相似性统计量，再选择最接近的两类或若干类合并成一个新类，直到所有样本都合并成一类为止[9]。

聚类分析进行分类的依据是样本间的接近程度或相似程度，可以用距离或相似系数来衡量。定义不同的距离量度和相似性量度就可能产生不同的聚类结果，本文研究选取欧氏距离作为相似性统计量。由于卫星测高仪接收到的波形不仅与反射面性质有关，还与卫星至反射面的距离有关，这使得有些波形虽然形状相似，在时间上（横轴方向）却可能有平移，它们应属于同一类波形。考虑到这种平移性，用移动最小欧氏距离作为两个波形之间的距离，移动最小欧氏距离的计算公式为：

$$d^2(P,P') = \min_{-k_0 \leqslant k \leqslant k_0} \left\{ \sum_{i=|k|}^{N-|k|} (P_{i+k} - P'_{i-k})^2 \right\} \quad (1)$$

式中，$d(P,P')$是两个波形 P、P'之间的距离，P_i表示波形 P 的第 i 个阀门的功率值，N 为波形总阀门数，对于 T/P 卫星 $N=64$。k 是位移参数，取值为$\pm k_0$之间的整数，对于 T/P 卫星的波形取 $k_0=8$。由式(1)可以计算得到各样本波形之间的距离矩阵，利用距离矩阵即可进行聚类，生成系统聚类谱系树图。

类与类之间的距离有很多算法，根据类间距离的计算方法的不同，有多种不同的聚类方法，各种方法得到的结果也可能存在差异。本文对以下4种方法的分类效果进行了比较分析：最短距离法（single linkage）、最长距离法（complete linkage）、类平均法（average linkage）和最小方差法（ward linkage）。设 G_m、G_n表示两个类，类中的样本数分别为 N_m、N_n，D_{mn}为这两个类之间的距离。最短距离法、最长距离法和类平均法将 D_{mn} 分别定义为G_m类中各样本与G_n类中各样本两两之间距离的最小值、最大值和平均。

最短距离法：

$$D_{mn} = \min_{P \in G_m, P' \in G_n} d(P,P') \quad (2)$$

最长距离法：

$$D_{mn} = \max_{P \in G_m, P' \in G_n} d(P,P') \quad (3)$$

类平均法：

$$D_{mn} = \frac{1}{N_m N_n} \sum_{P \in G_m, P' \in G_n} d(P,P') \quad (4)$$

最小方差法又称离差平方和法，它将类间距离 D_{mn} 定义为：

$$D_{mn} = N_m N_n d^2(\bar{P},\bar{P}')/(N_m + N_n) \quad (5)$$

式中，$\bar{P}$、$\bar{P}'$分别是 G_m、G_n类中样本的平均值，该方法并类时总是使得并类后的类内离差平方和增量最小。

3 结果与分析

以图1给出的16个波形为例，采用移动最小欧氏距离作为相似性统计量，分别利用最短距离

法、最长距离法、类平均法和最小方差法进行聚类分析。由于各个测高波形的振幅不同，在聚类分析前需将波形作规格化处理，规格化采用如下公式：

$$\widetilde{P}_i = \frac{P_i - \min(P)}{\max(P) - \min(P)},\ i = 1,\cdots,64 \quad (6)$$

式中，min(P)、max(P)分别是波形 P 的最小功率值和最大功率值，$\widetilde{P}_i$是波形 P 经规格化后的功率值，$0 \leqslant \widetilde{P}_i \leqslant 1$。对规格化后的波形进行聚类分析，得到的系统聚类树如图 2 所示。

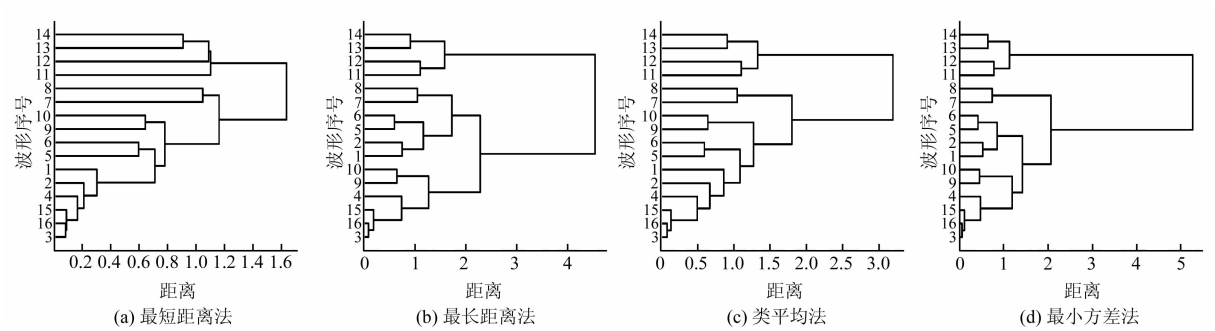

图 2　波形样本系统聚类树图

Fig. 2　Hierarchical Cluster Trees of Waveform Samples

由图 2 可以看出，当把所有波形分为两类时，四种聚类方法得到的结果是一致的，均把波形 11-14 归为一类，其他波形归为另一类，这种分类正好把海洋波形和非海洋波形区分开。分成 3 类时，最短距离法、类平均法和最小方差法的结果相同：{11-14}、{7，8}、{1-6，9，10，15，16}。除了海洋波形外，还把多峰型波形区分出来。而最长距离法的结果稍有不同，把{1，2，5-8}归为一类。分为 4 类时，最长距离法和最小方差法的分类效果最好，与前面的分析结果较为吻合，其中{11－14}为海洋波形、{7，8}为多峰型、{1，2，5，6}为宽峰型、{3，4，9，10，15，16}为尖峰型；最短距离法和类平均法的分类效果稍差，因为它们把海洋波形分成了两类，具体的分类结果参见表 1。综合以上分析，利用聚类分析对测高雷达波形分类可以有效区分各类波形，当以移动最小欧氏距离作为相似性统计量时，采用最小方差法聚类效果最好。

表 1　不同聚类方法的分类结果

Tab. 1　Results of Different Cluster Analysis Methods

分类数	最短距离法	最长距离法	类平均法	最小方差法
2	{11-14}	{11-14}	{11-14}	{11-14}
	{1-10，15，16}	{1-10，15，16}	{1-10，15，16}	{1-10，15，16}
3	{11-14}	{11-14}	{11-14}	{11-14}
	{7，8}	{1，2，5-8}	{7，8}	{7，8}
	{1-6，9，10，15，16}	{3，4，9，10，15，16}	{1-6，9，10，15，16}	{1-6，9，10，15，16}
4	{12-14}	{11-14}	{11，12}	{11-14}
	{11}	{7，8}	{13，14}	{7，8}
	{7，8}	{1，2，5，6}	{7，8}	{1，2，5，6}
	{1-6，9，10，15，16}	{3，4，9，10，15，16}	{1-6，9，10，15，16}	{3，4，9，10，15，16}

参　考　文　献

[1] Hwang C, Guo J Y, Deng X L, et al. Coastal Gravity Anomalies from Retracked Geosat/GM Altimetry: Improvement, Limitation and the Role of Airborne Gravity Data[J]. J Geod, 2006,80:204-216

[2] 姜卫平，褚永海，李建成，等. 利用 ENVISAT 测高数据监测青海湖水位变化[J]. 武汉大学学报・信息科学版，2008，33(1)：15-18

[3] Berry P, Jasper A A M, Bracke H. Retracking ERS-1 Altimeter Waveforms Over Land for Topographic Height Determination: An Expert System Approach[J]. ESA pub, 1997,1(SP-414):403-408

[4] Lee H, Shum CK, Kuo C Y, et al. Application of TOPEX Altimetry for Solid Earth Deformation Studies[J]. Terr Atmos Ocean Sci, 2008,19(1/2): 37-46

[5] Dabo-Niang S, Ferraty F, Vieu P. On the Using of Modal Curves for Radar Waveforms Classification [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2007,51: 4 878-4 890

[6] 李斐，王殊伟，柯宝贵. 应用聚类分析方法进行实测重力数据的选点优化[J]. 武汉大学学报・信息科学版，2009，34(3)：257-260

[7] 钟燕飞，张良培，李平湘. 遥感影像分类中的模糊聚

类有效性研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版，2009,34(4):391-394
[8] 褚永海. 卫星测高波形处理理论研究及应用[D]. 武汉:武汉大学,2007
[9] 余家林,肖枝洪. 多元统计及SAS应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2008

第一作者简介:汪海洪,博士。主要从事物理大地测量、卫星测高技术及应用的研究。
E-mail:hhwang@sgg.whu.edu.cn

Classification of Radar Altimeter Waveforms Based on Cluster Analysis

WANG Haihong[1,2] *YUE Yingchun*[3] *ZOU Xiancai*[1] *YANG Yuande*[1]
(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, SBSM, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266510, China)
(3 Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, 388 Lumo Road, Wuhan 430074, China)

Abstract: The feasibility of classifying satellite radar altimeter waveforms by cluster analysis is validated. According to the characteristic of radar waveforms, moving minimum Euclidean distance is proposed to be the similarity index for cluster analysis. This method can efficiently classify the radar waveforms. Taking the Topex/Poseidon coastal waveforms as an example, we compare four cluster analysis methods, such as single linkage, complete linkage, average linkage and Ward linkage. Results show that the Ward linkage cluster analysis is better than the others.

Key words: radar altimetry; waveform; classification; cluster analysis

About the first author: WANG Haihong, Ph D. His research interest is physical geodesy and satellite altimetry.
E-mail: hhwang@sgg.whu.edu.cn

(上接第832页)

Modulari Practice of Time Synchronization in Integrated GPS/INS Systems

ZHU Zhiqin[1,2] *WU Yuhong*[3] *YANG Yuanxin*[4]
(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(3 63869 Troops, Baicheng 137001, China)
(4 Air Force Engineering Design and Research Institute, Beijing 100068, China)

Abstract: Firstly, the limitations and advantages of various existing time synchronization solutions of GPS/INS are investigated in this paper. From the angle of modularity, a flexible low-cost time synchronization solution using a DAQ card and Labview software of NI in the way of both hardware and software is proposed and implemented. The test shows that a synchronization accuracy of 5 ms was achieved when the test system was applied to synchronize a low-grade micro-electromechanical inertial measurement unit (IMU), which only has an RS-232 data output interface.

Key words: GPS; INS; integrated system; time synchronization; modularity

About the author: ZHU Zhiqin, Ph. D candidate, lecturer, majors in satellite geodesy and integrated navigation system.
E-mail: zhqzhu@sgg.whu.edu.cn