文章编号:1671-8860(2011)01-0048-03　　**文献标志码**:A

复杂海域 ERS-1 卫星测高波形的波形分类方法研究

杨元德[1,2]　汪海洪[2]　鄂栋臣[1,2]　黄金维[3]

(1　武汉大学中国南极测绘研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2　武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3　台湾交通大学土木工程学系,新竹市大学路 1001 号)

摘　要:分析表明海域的两类基本波形类型为镜面和散射波形,提出了波形移动相关分析,用于复杂海域波形分类。在近海和南极海域实验区,对 ERS-1 回波信号波形分类。结果表明,脉冲峰值、β-5 和波形移动相关分析均可进行波形分类。

关键词:卫星测高;波形分类;镜面波形;散射波形;脉冲峰值;波形移动相关分析
中图法分类号:P228.3;P229.2

尽管卫星测高在地球科学研究中取得瞩目的成果[1,2],但测距精度和地球物理改正不准[3]等多种因素限制了卫星测高在非开阔海域[3-4](如近海和南极海域)的应用。

回波波形是卫星测高的直接观测量[5]。非开阔海域受其反射面性质影响,回波波形通常不满足 Brown 模型[2-3,6-9],降低了其测距精度。通常采用波形重定算法解决该问题,而不同反射面需要采用不同的波形重定算法,因此波形分类,即提取出不同反射面产生的回波波形,显得尤其重要,成为影响卫星测高在非开阔海域应用研究的关键问题。波形分类,一方面是研究不同反射面的最佳波形重定算法的基础,另一方面利用回波波形与反射面的对应关系,用于特定反射面(如海冰)的研究。

本文分析了海洋回波信号的基本波形类型,据此提出了波形移动相关分析法,用于近岸和水冰混合区等复杂海域的波形分类,利用 ERS-1/GM 波形数据在实验区比较和探讨了几种波形分类方法的实用性。

1　测高波形基本类型

1.1　Brown 模型

由 Brown 模型[6],开阔海域卫星测高平均海面波形可表示为[10]:

$$P(t)=\frac{A}{2}\left[\mathrm{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right)+1\right]=\begin{cases}1 & t<0\\ \exp(-t/\alpha) & t\geqslant 0\end{cases}\tag{1}$$

式中,A 表示波形振幅;σ 表示上升时间参数,反映有效波高的变化;t 为采样点与波形前缘中点的时间差;α 为与波形后缘有关参数;erf 为误差函数[9]。稳定运行的测高仪,α 可看成常数[10],本文选取 ERS-1 测高数据,$\alpha=137$ ns。

1.2　海洋回波波形的基本类型

对海洋回波波形进行分析,发现可将其分成以下 3 种:① 散射波形[11],其反射方式为散射,该波形是开阔海域回波信号的基本波形,符合 Brown 模型,由近岸海域和反射面粗糙及巨型浮冰产生[6,11];② 镜面波形[11],其反射方式为镜面或似镜面反射,不符合 Brown 模型,该波形是典型的海冰回波波形,由多年海冰之间的静态海水面或新冰的体表面产生,而海岸线周围的静态水体也产生该波形;③ 包含了多个波形前缘的复杂波形[3],通常在冰盖和近岸海域出现,该波形可简单看成散射波形和镜面波形的组合。因此,镜面波形和散射波形是海洋回波波形的两类基本波形类型。

收稿日期:2010-10-28。
项目来源:国家测绘局南极考察地区基础测绘资助项目(1469990711109-1);海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室资助项目(2009B04);国家 863 计划资助项目(2009AA12Z131);国家自然科学基金资助项目(40806076)。

2　波形分类

2.1　脉冲峰值

为了监测特定反射面[2,4]，学者们对波形分类进行了一定程度的探讨，常采用脉冲峰值 PP (pulse peakiness)区分散射和镜面波形，提取出特定反射面产生的回波波形。对于 ERS-1 卫星测高回波信号，PP 定义[4]为：

$$\mathrm{PP}=\frac{31.5\times P_{\max}}{\sum_{i=5}^{64}P(i)} \tag{2}$$

式中，$P_{\max}$表示回波波形最大采样值；$P(i)$表示第 i 个采样值。选取阈值 1.8[4]进行回波信号的波形分类，当 PP＞1.8，回波波形为镜面波形，反之为散射波形。

2.2　波形移动相关分析法

脉冲峰值通过计算 PP 和选定阈值进行波形分类，属于经验方法。对此，本文提出了波形移动相关分析法，探讨利用两基本波形类型的回波信号与理想散射波形的相关性不同，进行回波信号的波形分类。

本文利用相关分析作为定量分析手段，描述两波形之间的相关性。假定参考波形记为 $P_r(i)$，$i=1,\cdots,k$，任意波形记为 $P(i)$，$i=1,\cdots,k$，它们之间的相关系数 r 为：

$$\begin{aligned}
&\bar{P}_r=\sum_{i=1}^{k}P_r(i)/k,\ \bar{P}=\sum_{i=1}^{k}P(i)/k\\
&s_{rr}=\frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}(P_r(i)-\bar{P}_r)^2,\\
&s=\frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}(P(i)-\bar{P})^2\\
&s_r=\frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}(P_r(i)-\bar{P}_r)(P(i)-\bar{P}),\\
&r=\frac{s_r}{\sqrt{s_{rr}s}}
\end{aligned} \tag{3}$$

式中，k 表示用于求取相关系数的波形点数，对于 ERS-1 回波波形，其 $k=64$。波形相关系数与波形振幅无关，选取 $A=1$，有效波高 SWH＝5 m，由式(1)计算得到一理想发散波形。将该波形作为参考波形，而以 2 m 为间隔，SWH 由 1 m 增加到 19 m，计算得到相应的发散波形，与参考波形进行相关分析，由式(3)计算得到了相关系数。结果显示这些相关系数均高于 0.974，即理想发散波形之间高相关，选取任意 SWH 对应的波形作为参考波形进行相关分析都是可行的。

而实测的回波波形的热噪声和波形后缘误差较大，波形前缘精度较高，因此在与回波波形进行相关分析时，本文选取精度较高的波形前缘采样点为参考波形。假定参考波形采样点数为 m(m＜64)，无法与回波波形直接由式(3)进行波形相关分析。对此，将 64 个采样点的回波波形看成一组包含 $65-m$ 个元素的子波形序列，每个元素均为 m 个采样点的子波形，第一个子波形为 $P(1)$，…，$P(m)$，该子波形序列依次与参考波形进行波形相关分析得到一组相关系数序列 $r(1)$，…，$r(65-m)$，序列的每个值均表示子波形与参考波形的相关系数，极大相关系数 $r_{\max}$对应的子波形为回波波形的波形前缘，即有效子波形。有效子波形个数为 1，回波波形只有 1 个波形前缘，即为简单波形；个数超过 1 则回波波形包含多个波形前缘，为复杂波形。以上获取极大相关系数的过程称为波形移动相关分析。

理想发散波形高相关，任意选取 $A=1$，SWH＝5 m，由式(1)得到了理想发散波形，选其第 21～42 共 22 个采样点组成参考波形，用于波形移动相关分析。

2.3　实验数据与实验区域

本文选取的数据为 1994-04～1995-03 的 20Hz ERS-1/GM 波形数据，每个回波波形的采样数为 64，该数据在赤道区轨道间的距离约 8 km，覆盖范围为－82°S～82°N。实验区域包括一个近海和南极海域，分别位于 110°～130°E，10°～30°N 和 55°～95°E，－70°～－55° S，其中近海区和南极海域实验区分别包含了 624 和 1 251 条轨迹。

3　结果分析

参考波形为理想发散波形，当回波波形为发散波形，其 $r_{\max}$较大，而镜面波形对应的 $r_{\max}$则较小，需要确定阈值进行波形分类。对此，考虑到 β-5算法建立在 Brown 模型[9]的基础上，β-5 成功率(即回波波形中 β-5 成功个数与总个数的比值)作为判断散射波形的指标，即 $r_{\max}$越大，回波波形是散射波形的可能性越大，β-5 成功率越大。PP 和 β-5 的分类结果可为波形移动相关分析阈值的选定提供依据。

表 1 统计了两实验区各 $r_{\max}$区间对应的 β-5 成功率及由 PP 确定的发散波形的比例。结果显示，实验区，$r_{\max}$越大，β-5 成功率越高，其结果由小于 10％增加到超过 98％，这与预期结果一致。采用 PP 指标波形分类的结果也表明，$r_{\max}$越大，散

射波形所占比例越大。

表1 ERS-1/GM波形数据复杂海域波形分类结果

Tab.1 ERS-1 Classification Results Over Non-open Oceans

实验区域	极大相关系数	β-5成功率/%	PP<1.8波形所占比例/%
近海	<0.8	7.7	26.2
	0.8～0.9	36.2	47.3
	0.9～0.95	78	96.8
	>0.95	98.2	99.6
	In total	91	97.6
南极海域	<0.8	3.2	2.8
	0.8～0.9	27	6
	0.9～0.95	81.2	63.8
	>0.95	99	97.3
	In total	68.2	63.5

比较发现,β-5成功率与PP得到的波形分类结果一致,如近海,由β-5显示散射波形的比例约91%,PP为97.6%;而南极海域,β-5和PP得到的散射波形比例分别为68.2%和63.5%;两实验区域散射波形比例的不同,反映了南极海域回波波形受海冰的影响,两区域具有不同的反射特点。

根据各极大相关系数区间的β-5和PP的波形分类结果,选定极大相关系数的阈值进行波形分类。根据表1的结果,可选定$r_{max}>0.9$对应的回波波形为发散波形,$r_{max}<0.8$为镜面波形,而$0.8<r_{max}<0.9$则可能为两类基本波形类型的过渡波形。

β-5和PP得到的分类结果均显示各极大相关系数区间均分布着两类基本波形类型,这可能与相关系数区间过大及存在着介于镜面波形和散射波形之间的回波信号等有关。

4 结 语

波形分类是卫星测高在非开阔海域应用的关键,本文分析发现海洋回波信号可简单分成镜面和发散这两类基本类型。比较了脉冲峰值、β-5和波形移动分析法等3种不同的波形分类方法,结果表明3种方法的分类结果类似,均可用于波形分类。目前缺乏其他数据进行比较。波形分类结果也表明,近海和南极海域具有不同的反射特点。

参 考 文 献

[1] 李建成,陈俊勇,宁津生,等. 地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003

[2] Lee H K. Radar Altimetry Methods for Solid Earth Geodynamics Studies[D]. Ohio: Ohio State University, 2008

[3] Hwang C, Guo J, 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

[4] Peacock N R, Laxon S. Sea Surface Height Determination in the Arctic Ocean from ERS Altimetry [J]. J Geophys Research, 2004,109(C07):1-14

[5] Deng X L. Improvement of Geodetic Parameter Estimation in Coastal Regions from Satellite Radar Altimetry[D]. Australia: Curtin Univ of Technology, 2003

[6] Brown G S. The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1977,25(1): 67-74

[7] 杨元德,鄂栋臣,黄金维,等. Geosat/GM波形重跟踪反演沿海区域重力异常[J]. 武汉大学学报·信息学报,2008,33(12):1 288-1 291

[8] Rodriguez E, Martin M. Assessment of the Topex Altimeter Performance Using Waveform Retracking [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99 (C12): 24 957-24 969

[9] Martin T V, Zwally H J, Brenner A C, et al. Analysis and Retracking of Continental ice Sheet Radar Altimeter Waveforms[J]. Journal of Geophysical Research, 1983,88(C3):1 608-1 616

[10] Sandwell D T, Smith W H F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimeter [J]. Geophys J Int, 2005,163: 79-89

[11] Laxon S. Sea Ice Altimeter Processing Scheme at the EODC[J]. Int J Remote Sens, 1994,15: 915-924

[12] 杨元德,鄂栋臣,晁定波. 利用GRACE数据反演格陵兰冰盖质量变化[J]. 武汉大学学报·信息学报,2009,34(8):961-964

第一作者简介:杨元德,博士生,从事卫星测高及GRACE反演重力场研究。

E-mail:yuande_yang@yahoo.com.cn

(下转第70页)