

文章编号:1009-2722(2018)08-0068-05

# 基于地形频谱分析提高多波束条带拼接效果应用

马伟鹏<sup>1</sup>,杨海忠<sup>1\*</sup>,孙建伟<sup>2</sup>

(1 天津水运工程勘察设计院,天津 300456;2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

**摘要:**针对多波束测深系统条带拼接中的系统性残差问题,提出基于地形频谱分析的方法来削弱系统性残余误差的影响。该方法相对于传统的拼接方法,无需进行相邻条带 ping(激发)连续匹配,避免 ping 误匹配所产生的地形长波项不符的问题,并且所采用的多面函数不仅可获得所测条带的重叠区长波项信号,还可获得非重叠区的拟合信号。结果表明,采用地形频谱分析法所处理后,多波束测深数据残余误差的影响得到了显著的削弱,拼接精度显著提升。

**关键词:**地形频谱分析;多波束条带拼接;残余误差

中图分类号:P229.1

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.08009

在多波束测深数据处理中,条带拼接处理是海底测深平差处理的一部分,拼接的质量直接影响着边缘波束的测量精度。针对平差模型进行系统误差修正后仍遗留诱导性的残余误差,这些残余误差的影响具有系统性和综合性,借助常规的修正方法一般难以分离和削弱。因此,吴自银等<sup>[1]</sup>根据相邻条带重叠区深度值差异的问题,针对不同的误差源,采取不同的校正方法和可视化人机交互分布处理,但是没有从本质上削弱边缘波束残余误差的影响。赵建虎等<sup>[2]</sup>提出了一种基于地形几何纠正的残余误差削弱方法,取得了一定的改进,由于该方法是基于 ping 连续匹配处理,只能获得条带重叠区的地形长波项,而非重叠区域的残余误差难以削弱其影响。此外,受海底

地形复杂变化影响,采用平面或多项式曲面拟合方法<sup>[3,4]</sup>得到的地形长波项未能准确反映海底地形地貌特征。

本文在采用两步滤波法来削弱系统误差的基础上,针对非重叠区域的残余误差难以削弱的难题,提出采用地形频谱分析的方法,结合小波分析和多面函数拟合,对地形短、长波项信号进行拟合,进而融合两者信号,实现残余误差的有效削弱。两步滤波法为参考赵建虎等人的方法,在此不再赘述。这里主要论述地形频谱分析方法削弱系统性残余误差的原理和应用效果。

## 1 传统多波束条带拼接残余误差

条带拼接测深中声速、姿态和安装偏角等系统误差虽在数据处理中有所改正,但其诱导性的残余误差仍然存在,这给测点深度计算带来系统性影响,实测地形地貌图常呈“哭脸”或“笑脸”现象。如何检测和削弱条带测深数据<sup>[5,6]</sup>中的系统性残余误差将是水下地形测量亟须解决的问题。

残余误差对水深的影响具有系统性,其使得

收稿日期:2018-05-01

基金项目:自然资源部海洋基础地质调查项目(DD20160139)

作者简介:马伟鹏(1984—),男,工程师,主要从事物探方面的研究工作。E-mail:289639612@qq.com

\* 通讯作者:杨海忠(1985—),男,注册测绘师,主要从事海洋工程勘察工作。E-mail:yanghz08@163.com

水深长周期信号(长波项)难以真实地反映采样点的实际测深,但并不会影响地形实际起伏变化短周期信号特征(短波项)<sup>[7]</sup>。此外,基于各 ping 中央波束区测深数据质量精度可信,通过此类测深数据可拟合出海底地形的主趋势走向。

鉴于多波束条带拼接存在一定的误差,前人使用各种方法进行了细致化处理,但均有一定的局限性,未能解决多波束条带拼接引起的残余误差。

## 2 地形频谱分析多波束条带拼接残余误差方法

鉴于传统多波束条带拼接残余误差修正方法的局限性,提出一种基于地形频谱<sup>[8]</sup>分析的残余误差削弱方法。

### 2.1 方法思想

将地形水深信号频谱分解<sup>[8]</sup>,首先采用小波分析对高频信号进行特征提取,并以此作为短波项,然后利用多面函数法对地形长波项信号进行拟合,接着,将高频短波项信号和多面函数拟合得到的长波项信号进行融合,得到新的海底地形信号,最后,通过改正前后的深度不符值各项指标来评价融合信号,实现条带拼接中残余误差的有效削弱。

### 2.2 信号提取

海域的复杂性、系统的不足之处均可能对测深数据产生粗差影响,因此本文原始数据采用 Ware, Knight, and Wells 方法对粗差进行诊断和标定。同时船姿、声速和某些辅助设备的补偿测量参数等具有随机性,对测深呈现出系统性,尤其在边缘波束区显著,通过两步滤波法来进一步改善测点数据质量,消除或削弱系统误差的影响。综合上述数据处理工作,获得存在诱导性残余误差的水深数据,将其作为本文地形频谱分析方法的数据基础。

残余误差并不会影响地形的细微变化特征,即地形的短波项信号非常可信。而小波变换具有提供局部细化功能的优点,在时域和频域内都能表征信号的特征,通过伸缩平移运算对信号进行

多尺度分解。

由于前期数据处理后的测深数据夹杂着异常的长周期信号,难以反映实际的海底地形变化,但考虑每 ping 中央波束区测深数据可靠,可采用多面函数进行拟合相邻条带的地形主趋势,作为长波项信号。多面函数以“任何一个规则或不规则的连续曲面均可以由若干简单面来叠加逼近”为理论依据。每一插值点同所有已知点建立函数关系,将已知点对它的贡献值叠加起来代表其最佳的拟合值。

### 2.3 残余误差的效果评估

基于上述所得的短波项和长波项信号,融合成一个全新的信号。一般利用重叠区深度不符值的各项指标来检验和评定残余误差削弱的效果,但实际上在相邻两条带边缘波束区相同位置的脚印点同时得到测定的概率很小。因此,文中相同位置的目标点判定方法如图 1 所示,设左条带边缘波束点 P1(带星号),水深值为  $Z_{p_1}$ ,在对应右条带 ping 对和其相邻 ping(防止 ping 配对不成功,但也就在其相邻 ping 中)中寻找平面最小距离点 P2(三角形),水深值  $Z_{p_2}$ ,改正前和改正后合成信号的测深深度不符值  $\Delta Z_p$  及其标准差公式为:

$$\Delta ZP = Z_{p_1} - Z_{p_2}, \text{STD} = \Delta Z_p \Delta Z_p / n$$

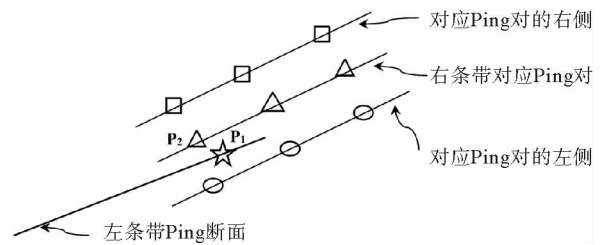


图 1 相邻条带目标点的寻找方法

Fig. 1 Search method of target points in adjacent strip

## 3 测试结果与分析

测区位于南中国海,水深范围为 1 100 ~ 1 400 m,地形变化平缓,共 29 个条带,如图 3 所示。测试说明:本测试将采用 2 个实验进行对比分析残余误差削弱效果。即,两相邻条带局部区域 40 ping 对数据(测试 1)和测区多条带大区域进

行测试(测试2)。测试1中的最优参数的选择也将作为测试2的参考指引,尤其是长波项拟合信号中最优节点的参数作为测试2的基准参数。

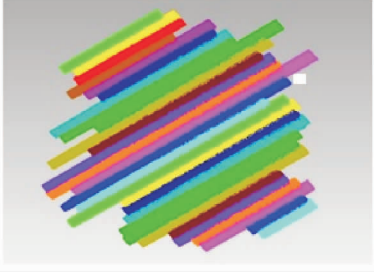


图2 测区条带分布图

Fig. 2 Strip distribution map of the measured area

以3倍标准差对分割区域进行异常点的Ware法自动滤波处理,以及采用两步滤波法进行系统误差改正,将改正后的测深数据作为本文实验数据基础。实验步骤如下:

(1)对区域中的所有ping数据小波分析提取高频信号,根据小波基、信噪比、平滑度指标选取最优小波参数,得到区域地形短波项信号;

(2)同理,采用多面函数拟合出区域的整体主趋势走向,确定多面函数的最优参数数量,最终获得区域地形长波项信号;

(3)融合地形短波项和长波项信号,生成新信号,对重叠区域测深数据一致性进行评估,分析残余误差的削弱效果。测试1和测试2分别为残余误差削弱效果对比分析;

(4)对8个多条带大区域重复1~3步骤实验,得到整个测区的拟合中误差、节点个数和程序运行时间,最终整个测区海域的残余误差削弱效果如图4b所示。

### 3.1 两相邻条带局部区域测试

测试1小波分析提取高频短波项信号中各评价指标结果如表1所示。从表1中平滑度(越大越好)角度分析,不同的小波基和分解层数的影响为毫米和厘米级别,因此选取的不同参数数量对区域平均高频信号的影响差距不大。而从中误差和信噪比指标(越小越好)分析,最优的小波基为coif5,分解层数为3层,此时各项参数是最佳的。因此,综合3种指标,将小波基coif5、分解层数为

表1 3种评价指标对不同小波基和分解层数的评价结果  
Table 1 The evaluation results of 3 evaluation indexes for different wavelet bases and decomposition layers are given

小波基函数	分解层数	均方差/m	信噪比	平滑度
Db6	3	1.014	62.738	0.072
	5	1.165	61.535	0.056
Sym	3	1.007	62.798	0.074
	5	1.157	61.597	0.060
Coif	3	1.004	62.820	0.075
	5	1.155	61.607	0.060

3层作为整个测区的高频信号提取的最优小波参数数量。

通过多面函数最优参数的选取,得到了测试1的地形长波项拟合信号,如图3b所示,拟合后的边缘波束长波项反映的地形变化与中央波束基本保持一致趋势,能有效的消除条带间隆起现象,验证了多面函数参数选取方法的可行性。

### 3.2 测区多条带大区域综合测试

测试1只是选取了相邻两条带局部区域,整个测区远远大于40ping对,处理繁琐、耗时且效率低。若相邻条带整体进行处理,此时法方程矩阵庞大,实测点关联性强,会导致法方程秩亏,求解精度降低,甚至无法求解。因此根据测区条带数据量的大小,进行多条带切割成8块大区域,从而提取整个测区的地形长波项信号。多条带大区域实验范围宽度通常大于10km,此时多面函数最优参数的选取采用上述测试1的思路,通过多次试验,大区域的最优光滑因子为10000,核函数为正双曲面函数,每条带每隔5ping选取一个ping,而在此ping中央波束区均匀选取5个点作为已知节点,此时的拟合精度、运行时间和法方程矩阵大小取得不错的效果。

对8块大区域反复提取对应本身的长波项信号,得到各区的拟合中误差、节点个数和程序运行时间,统计参数如表2所示。由表2可以看出,每个区域都有重叠条带区域,可以保证分区实验公共条带地形一致趋势。通过实验最优参数的选取,大多数区域拟合中误差始终控制在2.0m左右,水深相对精度为14~18mm,完全符合深水海域测深精度要求,同时每个区域都有重叠条带,

保证了地形的一致性。

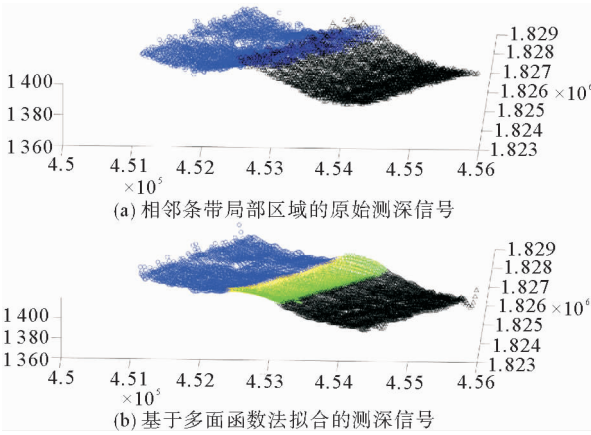


图 3 测深长波项信号提取效果图

Fig. 3 Long term wave measuring signal extraction effect

表 2 整个测区各区域的统计参数

Table 2 Statistical parameters of the whole area

测区 区域	条带 编号	节点个 数/个	拟合中 误差/m	程序时间 损耗/s
Area 1	1—5	702	1.766 8	145.382
Area 2	5—9	114 2	2.024 6	409.135
Area 3	9—12	114 1	2.007 6	403.202
Area 4	15—18	140 6	2.039 4	727.538
.....	.....	.....	.....	.....

小波最优参数将继续采用测试 1 中最优值,最终融合地形短波项和长波项信号,对重叠区域测深数据一致性进行评估分析残余误差的削弱效果,并与测试 1 局部区域残余误差削弱效果进行对比,如表 3 所示。

表 3 残余误差削弱评估参数

Table 3 Statistic evaluation parameters of residual errors

实验	改正状态	最大偏差/m	最小偏差/m	均值/m	标准差/m
实验 1(相邻条带的 40ping 对测深数据)	改正前	8.000 0	-11.200 0	-0.867 4	3.052 0
	改正后	5.606 4	-4.791 5	-0.026 3	1.643 4
实验 2(整个测区 条带综合处理)	改正前	18.804 9	-19.767 7	-1.973 0	4.401 5
	改正后	6.368 0	-7.237 3	-0.070 5	1.940 0
快速傅里叶变换方法 (整个测区条带综合处理)	改正前	36.560	-21.711	2.859	4.730
	改正后	14.937	-9.992	0.704	2.645

通过表 3 分析,测试 1 的各项残余误差评估参数效果更好,但测试 2 可以快速处理大数据,通过适当地降低精度,仍能达到削弱残余误差的目的。从均值可以看出,改正前的测深数据中明显存在系统误差,经过改正后,合成信号的深度不符值均值接近 0,符合高斯分布特征,表明本文方法可以有效地削弱系统性残余误差。从最值偏差和标准差可以看出,改正后相邻条带边缘波束区测深数据的深度不符值相对改正前聚敛性得到了提高,但少量点仍存在 6~7 m 左右的偏差,主要是测试是基于中央波束区的数据可靠性分析,但通过原始展点视图可以看到,观测数据中还存在少量难以剔除的冗余粗差数据,这影响测试的质量效果,因此测试前还需要通过一定的方法剔除水深异常值。

整个测区原始海床 DEM 和等深线图如图 3a 和 4a 所示,在条带拼接处呈现凹凸不平地形。经本文地形频谱分析方法处理,最终整个测区海域改正后的 DEM 和等深线图如图 4b,滤波后的测

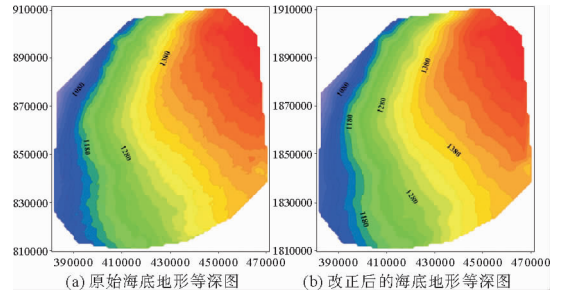


图 4 等值深图效果对比

Fig. 4 Comparison of the effect of equal value depth map

深数据既能有效的反映消除了“隆起”现象,又能合理体现出测区海床细节地形变化特征。

通过测试 1 和测试 2 综合分析,得出:

(1)测试 1 验证了本文频解分析方法的可行性,同时其也是多条带区域扩展测试 2 的前提分析,具有一定的参考价值 and 对比示例。针对数据量大且每区域地形不一的情况,采用分区多条带处理,通过稀疏选取的节点,适当地降低拟合精度来

达到快速处理整个测区残余误差削弱控制的目的。

(2)相对于传统方法,本文方法无需进行相邻条带 ping 连续匹配,避免 ping 误匹配所产生的地形长波项不符的问题,并且所采用的多面函数不仅可获得所测条带的重叠区长波项信号,还可获得非重叠区的拟合信号。此外,最优参数的各评价指标能有效的评估短波项和长波项信号。

## 4 结论

本文提出一种地形频谱分析的方法来削弱系统性残余的误差。该方法根据频谱分解的思想,将测深数据分解为长波项和短波项信号,采用小波变换来提取地形起伏的微变化信息,利用多面函数来拟合出整个相邻条带区域的主要趋势面,融合长、短波项信号生成新息信号,最终采用一种新的目标判定方法来求取测深不符值,通过各种改正指标进行评估残余误差的效果。测试结果表明,大多数区域拟合中误差始终控制在 2.0 m 左右,水深相对精度为 14~18 mm,完全符合深水海域测深精度要求,保证了地形的一致性。

**致谢:**感谢中国海洋大学童思友老师对本论文的指导。

### 参考文献:

- [1] 吴白银,金祥龙,郑玉龙,等.多波束测深边缘测深波束误差的综合校正[J].海洋学报,2005,27(4):88-94.
- [2] 赵建虎,张红梅,严峻,等.削弱残余误差对多波束测深综合影响的方法研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2013,38(10):1185-1186.
- [3] 陈光洲,岳东杰,王锋,等.基于迭代空间体元推理的多波束测深数据异常值探测[J].勘察科学技术,2016,3:23-24.
- [4] 陈传法,刘凤英,闫长青,等.DEM建模的多面函数 Huber 抗差算法[J].武汉大学学报:信息科学版,2016,41(6):804-805.
- [5] Tyce R C. Seabeam data collection and processing development[J]. MTS Journal, 1988, 21(2):80-92.
- [6] Mann M, Agathoklis P, Antoniou A. Automatic outlier detection in multibeam data using median filtering[C]//IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 2001, 2:690-693.
- [7] 陶叶青,高井祥,姚一飞.基于中位数法的抗差总体最小二乘估计[J].测绘学报,2016,45(3):298-230.
- [8] 吴文峰,刘毅慧.基于高频系数小波分析的高维蛋白质波谱数据特征提取[J].生物信息学,2015,13(3):199-201.

# IMPROVEMENT OF MULTI-BEAM STRIPE SPLICING EFFECT BASED ON TOPOGRAPHIC SPECTRUM ANALYSIS

MA Weipeng<sup>1</sup>, YANG Haizhong<sup>1\*</sup>, SUN Jianwei<sup>2</sup>

(1 Tianjin Water Transport Engineering Institute of Surveying and Designing, Tianjin 300456, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Systematic residue is a common problem in strip splicing of the multi-beam sounding system. We proposed in this paper a method to weaken the influence of the systematic residual error based on the topographic spectrum analysis. A comparison is also made with the traditional method. Different with the traditional method, this method does not require continuous matching of adjacent strip ping, and thus we may avoid inconsistent problem of terrain long wave caused by ping mismatching. In addition, polyhedral function can be obtained by measuring the wave band overlap region, and signal can also be fitted signal non overlap ping regions. The evaluation indexes of the optimal parameters can effectively evaluate the short wave term and the long wave term signal. And the multifaceted function can not only obtain the overlap ping region long wave term signals of the measured strip, but also the fitting signal of the non-overlap ping region. The experimental results show that the impact of the residual error of the sounding data processed by the topographic spectrum analysis method has been greatly improved.

**Key words:** terrain spectrum analysis; multi beam strip splicing; residual error