

基于单波束多波束测深系统的海洋航道测量方法

王文杰

(天津水运工程勘察设计院 天津 300456)

摘 要: 海洋航道测量对于保证船只航行的可靠运行具有重要意义,而当前在异常测量方面采取的系统所利用的仅仅是测量误差时间或空间相关性的一种。充分考虑到现有单波束多波束测深系统(SBMBBS)存在的不足以及误差矩阵的时空相关性,基于单波束多波束测深系统而提出了海洋航道测量方法。该系统中充分发挥了海洋航道测量具有的降维能力以及小波变换的多尺度建模能力,来构建测量误差系统。在对残余测量误差进行分析时,主要是通过指数加权移动平均法控制图实现。并且有效运用了滑动窗口机制实现了单波束多波束测深系统的海洋航道测量,由此而获得了在线的 SBMBBS。通过对海洋航道测量数据以及得到的模拟结果进行分析,能够得出和鸟群算法(BSA)与 K 均值冷光技术算法(KLE)算法相比,SBMBBS 算法的优势更加突出,具有更优的测量性能。结果表明,在线 SBMBBS 算法测量性能与 SBMBBS 算法十分接近,并且需要很短的单步执行时间,符合海洋航道测量的要求。

关键词: 海洋航道测量;单波束多波束测深系统;测量误差矩阵;在线测量

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Sea channel survey method considering single beam multi beam bathymetric system

Wang Wenjie

(Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Marine channel measurement is of great significance to ensure the reliable operation of ships. Currently, the system used in anomaly measurement is only one of the time or spatial correlation of measurement errors. Considering the shortcomings of the existing single-beam multi-beam bathymetric system (SBMBBS) and the spatio-temporal correlation of the error matrix, a method of ocean channel measurement is proposed based on the single-beam multi-beam bathymetric system. In this system, the dimension reduction ability of ocean channel measurement and the multi-scale modeling ability of wavelet transform are fully utilized to construct the measurement error system. In the analysis of residual error, it is mainly achieved through control charts. In addition, the sliding window mechanism is effectively used to realize the ocean channel measurement of single-beam multi-beam bathymetry system, from which an on-line SBMBBS is obtained. Through the analysis of the measured data and the simulation results, it can be concluded that compared with the BSA algorithm and KLE algorithm, SBMBBS algorithm has more prominent advantages and better measurement performance. The results show that the measurement performance of the online SBMBBS algorithm is very close to that of the SBMBBS algorithm, and requires a very short one-step execution time, which meets the requirements of ocean channel measurement.

Keywords: marine channel survey; single beam multi beam bathymetric system; measurement error matrix; online measurement

0 引 言

对于如今的海洋航道测量,各种异常行为发生的频率不断增大^[1]。因此,海洋航道测量异常行为是否能够有效测量出来,对于海洋航道测量的运行是否可靠具有重要影响^[2]。而且考虑到海洋航道测量异常行为其系统是多样

的,并且其背景测量误差也十分复杂。因此,进行高效地海洋航道测量极具挑战性^[3]。基于海洋航道测量误差的显著变化通常揭示了海洋航道测量异常行为的发生,因此,在测量异常时通常都是通过对海洋航道误差测量实现,主要是通过进行被动测量以及进行单条海洋航道测量误差的变化测量来实现的。文献[4-5]充分发挥小波变换方法的优势,

对测量误差异常特征进行了解释。该方法主要是对海洋航道测量误差的时间相关性进行研究,充分利用多尺度的研究方法,得到的测量效果较为良好^[6]。然而,这种方法有其弊端,主要体现在其研究只是针对单条海洋航道测量误差,导致其对异常测量的能力受到了限制,这种限制主要是由于异常行为对海洋航道测量的影响并不是单一条的,而是反映在多条上的,如果仅仅对其中的单一条进行分析,得到的结果并不十分显著^[7-8]。为了有效改善这一不足,首次在其测量中将数据源确定为测量误差矩阵,并且基于鸟群算法(bird swarm algorithm,BSA)方法构建了海洋航道测量。该系统对于多种测量误差间具有的空间关联性进行了充分的考虑,实现了测量误差矩阵从高维到正常与异常空间的顺利映射,进而异常行为模式能够在异常空间内得以凸显^[9-10]。然而这种方法从根本而言还是属于单尺度分析,对于测量误差矩阵的考虑也仅仅是停留在其空间相关性上,而对于时间相关性则考虑不足^[11-13]。

为了有效地改善上述两类方法存在的不足,本文尝试将单波束多波束测深系统运用到海洋航道测量中。首先对单波束多波束测深系统存在的时空相关性进行验证,主要是利用BSA与小波转换实现的。随后,运用BSA实现测量误差矩阵的降维,发挥小波变换可多尺度建模的能力,以休哈特控制图(Shewart control chart)、指数加权移动平均值的控制图(exponentially weighted moving-average,EWMA)两种控制图方法来实现对残余的分析,由此确定了单波束多波束测深系统(single beam multi beam bathymetric system,SBMBBS)。该系统通过滑动窗口机制能够实现系统的海洋航道测量,由此得到海洋航道测量方法^[14-15]。

1 相关工作

单波束多波束测深系统可依据其针对的测量范围区别对测量方法进行分类,主要为:针对主机的单波束多波束测深方法、针对单条海洋航道测量误差的测量方法、针对测量误差矩阵的测量方法。

首先单波束多波束测深系统,其实现的主要思路如下:测量的数据源为主机系统日志及其审计记录,通过机器学习来对用户正常行为模式进行研究,并且成功建立正常模式,随后对偏离正常行为模式的程度进行度量,进而对海洋航道进行很好的测量^[16-18]。

针对单条海洋航道测量误差的,其单波束多波束测深系统主要是通过进行被动测量,以及对单条海洋航道测量误差进行分析实现。该系统的基本思想为通过分析海洋航道测量误差存在的时间相关性,充分发挥小波变换具有的多分辨率分析方法来实现对误差数据的多角度分析,从而有效地分离确定性信号以及随机信号,凸显异常行为。

近年来最新兴起的单波束多波束测深系统为基于测量矩阵的异常测量,该方法有效弥补了单条海洋航道测量误差系统存在的不足,充分发挥了测量误差矩阵具有的时空

相关性,在信号处理时采用了多元统计的分析方法,对异常行为的测量是通过海洋航道测量角度实现的。研究中确认的数据源为测量误差矩阵,从而测量误差矩阵的低维特征得以首次彰显,在此基础上,实现了基于BSA的海洋航道测量。经过模拟实验,验证了该方法的优越性,尤其是和单条海洋航道测量误差方法相比,对该方法还有待完善的地方进行了深入研究,主要体现在以下几方面:1)测量性能受到的来自其正常空间主成分数的影响;2)以及正常子空间受到的来自异常测量误差的毒害;3)算法有效性受到的来自测量误差聚合的影响。提出应充分发挥多条海洋航道测量在测量误差方面存在的空间关联性,可通过SBMBBS方法对误差矩阵的主成分进行确定,从而有效构建正常与异常子空间,随后通过异常子空间有效的对异常行为进行测量。这种做法存在一定缺陷,没有对误差矩阵的时间相关性进行充分考虑,仅仅是对其空间相关性进行了分析。为了有效解决这一问题,在构建单波束多波束测深系统时,对于其时空相关性都进行考虑,实现了BSA方法的进一步推广,将其进行变换得到了k均值冷光技术算法(k-means luminescence electro, KLE)展开式,从而以此为基础实现了单波束多波束测深系统的构建。经过实验得出,相较于BSA方法而言,KLE计算方法在测量性能方面更优。然而由于后者的测量数据采取的是固定时间间隔,这就导致其不具备多分辨分析能力。而前者采取的是离线算法,不能够实时地对异常进行测量。

本文所提出的海洋航道测量方法,是基于SBMBBS方法实现的,其中选择了测量误差矩阵作为系统测量的数据源。该方法有效地发挥了小波变换具有的多维分析能力以及BSA方法具有的降维能力,对于测量误差矩阵的时空相关性进行了充分的考虑。并且通过数据分析及模拟实验对系统的测量性能进行了验证分析,结果表明,本文提出的方法在测量性能方面优于BSA方法以及最新提出的KLE方法。本文还通过对海洋航道测量方法进行海洋航道测量,实现了对异常测量的即时性测量,增强了测量性能。

2 单波束多波束测深系统

1)测量误差矩阵。指的是在一个海洋航道测量中,所有的OD对之间存在的测量误差需求,也就是源节点与目的节点之间的误差需求(traffic demand)。测量误差矩阵可根据其节点选择的不同确定矩阵具有的不同粒度:路由级、point of presence 测量误差矩阵等。

2)PoP级测量误差矩阵。如果本文假设在某个AS系统(autonomous system)中存在PoP点共有 n 个,在相同的时间间隔内对任意2个PoP点进行测量误差的被动测量,将得到的误差值以矩阵形式表示出来,从而获得一个 $T \times p$ 的矩阵 $\mathbf{X}$,将所有测量误差时间序列都包含其中。其中字母 T 表示了测量周期; p 则表示在每一个周期内得到的测量数据个数,即 $p = n \times n$ 。矩阵中的第 t 行代表了该行

测量数据是在第 t 个周期内测量得到的,以 x_t 表示;矩阵中的第 j 列则代表了系统中第 j 个 PoP 点对其间的测量误差时间序列。矩阵 $\mathbf{X}$ 即为测量误差矩阵。本文测度为测量误差大小,故而,矩阵中的任一 x_{ij} 元素表示的是在第 t 个时间间隔内得到的第 j 个 OD 对间的测量误差。

本文针对误差矩阵存在的时空相关性构建了单波束多波束测深系统,并充分发挥了偏倚抽样与小波变化在系统分析中具有的优势,对矩阵中正常误差值构建了分析系统,并且通过进行残余误差分析对其中的异常进行了有效测量,最后还对本系统的时间复杂度进行了分析。

2.1 测量误差建模

基于小波变化能够对确定信号进行准确的抽取,以及BSA方法从多元变量中得到其共有模式的特征,基于SBMBBS方法的测量系统是能够较好的满足正常测量误差系统构建要求的。

按照如图1所示流程基于SBMBBS方法构建正常测

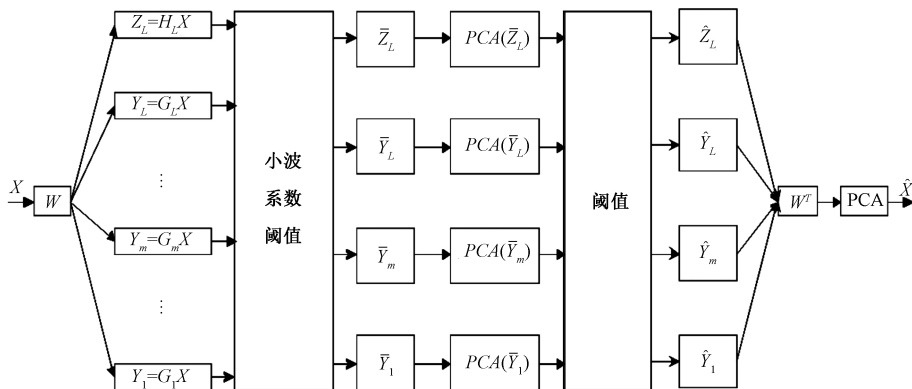


图1 基于SBMBBS的正常测量误差建模流程

2.2 残余误差分析

得到正常测量误差系统后,突发性测量误差与噪声构成了残余误差的主要成分。突发性测量误差是由于发生了异常行为导致的,而噪声则主要是来自测量误差系统存在的自身误差。本文采取了平方预测误差(squared prediction error, SPE)分析方法。

$$Q_i = \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2 \quad (1)$$

考虑到不同的异常测量误差存在的变化差异较大,如果误差传播范围不断扩大,则 worm 的测量误差会不断增加;而突发流(flash crowd)如果进行了攻击行为,那么测量误差也会快速增加。基于此,本文在对参与测量误差进行测量时,选择了 Shewart 和 EWMA 控制图。前一个控制图对于误差的快速变化能够较快地测量,然而对于变化速度较慢的测量效果并不好,而后一个控制图则可针对变化缓慢持续时间长的异常误差进行测量。

1) Shewart 控制图

Shewart 控制图方法确定的测量阈值为 Q 统计量,以

量误差系统,其步骤如下:

1)对误差矩阵进行小波分解。首先对矩阵 $\mathbf{X}$ 进行多尺度分解,主要是通过标准正交小波变换实现的。从而能够得到不同的尺度下矩阵的小波系数矩阵 $Z_L, Y_m (m = 1, \dots, L)$, 随后通过 MAD 方法过滤小波系数,得到:

$$\bar{Z}_L, \bar{Y}_m (m = 1, \dots, L)$$

2)对矩阵 $\bar{Z}_L, \bar{Y}_m (m = 1, \dots, L)$ 进行偏倚抽样分析与重构。偏倚抽样分析是首要步骤,随后通过 screeplot 方法对 PC 数目进行确定,最后实现矩阵 $\hat{Z}_L, \hat{Y}_m (m = 1, \dots, L)$ 的重构。

3)对测量误差矩阵进行小波重构。依据得到的 $\hat{Z}_L, \hat{Y}_m (m = 1, \dots, L)$ 矩阵,进行小波逆变换 W^T 实现误差矩阵的重构。

4)对误差矩阵进行偏倚抽样分析与重构。类似于步骤 2),最终可获得重构的误差矩阵 $\hat{\mathbf{X}}$ 。

此测量 SPE 时间序列, Q 统计量阈值定义为:

$$\delta_\alpha^2 = \phi_1 \left[\frac{c_\alpha \sqrt{2\phi_2 h_0^2}}{\phi_1} + 1 + \frac{\phi_2 h_0 (h_0 - 1)}{\phi_1^2} \right]^{\frac{1}{\lambda_1}} \quad (2)$$

式中: $h_0 = 1 - \frac{2\phi_1 \phi_3}{3\phi_2^2}$; $\phi_i = \sum_{j=r+1}^p \lambda_j^i, i = 1, 2, 3; \lambda_j$ 将矩阵 $\mathbf{X}$ 投影至第 j 个主轴能够实现方差捕获,从而能够得到第 j 个特征值; c_α 是标准正态分布中 $1 - \alpha$ 分位数,取 α 为 0.001; δ_α^2 代表了当去 $1 - \alpha$ 置信度时得到的 SPE 阈值,而此时如果存在 $SPE \geq \delta_\alpha^2$, 可说明存在异常。

2) EWMA 控制图

EWMA 控制图在测量系统中发挥的主要作用是,将历史数据作为分析依据,对未来下一时刻值进行预测。 $\hat{Q}_t$ 表示第 t 时刻得到的残余测量误差预测值, Q_t 表示其在第 t 时刻的实际值, $\hat{Q}_{t+1}$ 表示其在 $t + 1$ 时刻的预测值。

$$\hat{Q}_{t+1} = \alpha Q_t + (1 - \alpha) \hat{Q}_t \quad (3)$$

式中: $0 \leq \alpha \leq 1$ 为平滑指数,代表历史数据具有的相对权重。

由式(3)进行迭代能够得到 $|Q_t - \hat{Q}_t|$ 即实际值与预测值的差额,该差额为 EWMA 过程统计量。同时可将 EWMA 控制图控制极限进行如下渐进表示:

$$UCL = u_s + L \times \sigma_s \sqrt{\frac{\alpha}{(2-\alpha)T}} \tag{4}$$

式中: σ_s 表示 EWMA 过程统计量的均方差;而 u_s 表示该统计量的均值; α 如上为平滑指数; L 则为控制图常数,该常数对于测量结果有直接的影响; T 表示时间序列长度,如果存在 $|Q_t - \hat{Q}_t| \geq UCL$, 说明出现异常。

2.3 算法复杂度分析

本文提出的 SBMBBS 单波束多波束测深系统,计算开销主要集中在对误差矩阵进行小波变换,以及对其进行偏倚抽样分析等方面。算法完成后,将采用时间复杂程度为 $O(T)$ 的 Mallat 算法进行小波变换,而偏倚抽样分析算法时间复杂度为 $O(Tp^2)$, 因此,该异常测量方法的总时间复杂度为 $O(Tp^2 + Tp)$, 即 $O(Tp^2)$ 。

3 海洋航道测量方法分析

SBMBBS 进行的异常测量需要在误差矩阵已经完成测量后才能进行,因此,是一种离线测量的方式,这就不能实现对异常的实时测量。本文为了改善这一不足,提出了针对该测量方法的海洋航道测量方法,得到了在线 SBMBBS 单波束多波束测深系统。

其基本原理如图 2 所示。该在线测量系统主要是通过滑动窗口机制实现的,通过该手段有效的将测量过程进行了划分,即初始与滑动阶段。在前一阶段,主要是得到测量误差矩阵,这就要求选择测量数据中的前 WIN 个,同时利用 SBMBBS 异常测量方法来对残余测量误差进行计算,运用 EWMA 控制图对异常进行适时警报;在后续的滑动阶段,则保证每隔一个时间间隔,滑动窗口中都能加入最新的测量数据,同时剔除旧的测量数据,由此保证窗口长度不变,同样的利用 SBMBBS 方法对获得的最新测量数据残余测量误差进行计算,通过 EWMA 控制图进行警报。同时考虑到此时经常应用的是 Mallat 算法,为了加快小波变换速度,设置 2 倍的滑动窗口长度,本文中 $WIN = 2^9$ 。

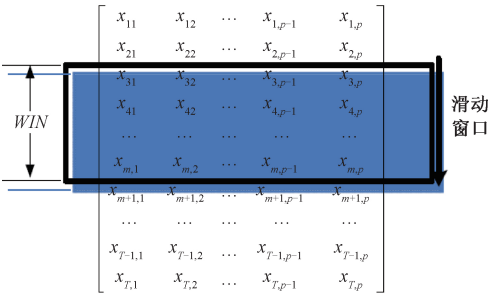


图 2 在线 SBMBBS 单波束多波束测深系统的原理

实时在线异常测量的重要指标是时间复杂度,本文中在线 SBMBBS 方法中,在进行单步执行时,确立了

$O(WIN \times p^2)$ 的时间复杂度。对数据集 F 进行在线异常测量,结果显示单步运行时间不足 1 s,符合异常测量要求。

4 实验评价

目前主要采取测量数据分析以及模拟实验两种方法对单波束多波束测深系统的测量性能进行评价。考虑到两种方法各有其优势与不足,本文选择两种方法相结合的方式对系统性能进行评价。

4.1 海洋航道测量实测数据实验

1)数据集

本文选用了 Abilene 海洋航道测量误差数据构成了所需的误差矩阵。该海洋航道测量的分组速率相对较高,这就导致通过测量装置难以对各分组数据流有效捕获,因而,Abilene 海洋航道测量在对流数据进行收集时确认的采样率为 1%。本文测量系统中的测量误差数据集如表 1 所示,数据集都是来自实测数据,即其中有异常与突发测量误差。下面,本文将会通过相关实验对 SBMBBS 方法的异常测量效果进行验证。

表 1 Abilene 测量误差矩阵数据集

序号	持续时间	间隔		矩阵形式	数据集
		时间/ min	测度		
1	2003.12.15—12.21	5	字节数	2 010×121	B
2	2003.12.15—12.21	5	分组数	2 010×121	P
3	2003.12.15—12.21	5	流数	2 010×121	F

2)评价方法

本文对测量方法性能的测量是通过工作特性(operation characteristic, ROC)曲线实现的。该曲线中其 x 轴代表了误报率(false positive rate, FPR), y 轴则代表了测量率(true positive rate, TPR)。ROC 曲线上的点与一组 FPR 和 TPR 相对应。通过该曲线能够得到两者在不同测量阈值下的折中。假如随着横坐标的不断加,曲线的纵坐标趋向于该图左上角,则可说明算法能够在较小的 FPR 下,得到较高的 TPR,即能够证明算法性能是十分不错的。通过该曲线下方覆盖区域的面积大小能够实现对算法性能的定量分析,该面积越大说明性能越优。

3)测量性能

分别采取 SBMBBS、BSA 算法对表 1 中 B、P、F 3 个数据集进行测量。其中,SBMBBS 算法主要通过 db5 小波与 Shewart 控制图实现,得到的测量结果如图 3 所示。通过对比分析能够得出,SBMBBS 具有更优测量性能。以 F 数据集为例,SBMBBS 算法在 0.1 的误报率下得到了 0.85 的测量率。

同时以 SBMBBS 算法与 KLE 算法对表 1 中的 B、P、F 3 个数据集实施测量,其中 KLE 算法设定的时间相关幅度

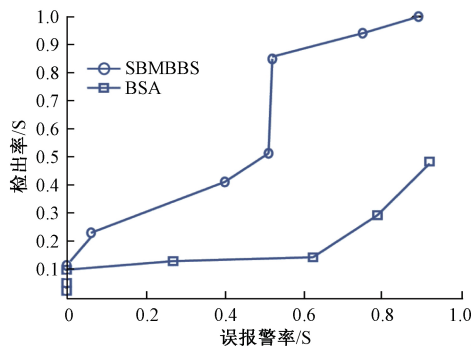


图3 SBMBBS和BSA算法对实测数据的测量结果和测量性能

为2。分析结果如图4所示,能够得出在3个数据集的测量中,SBMBBS算法表现出了更优的测量性能。

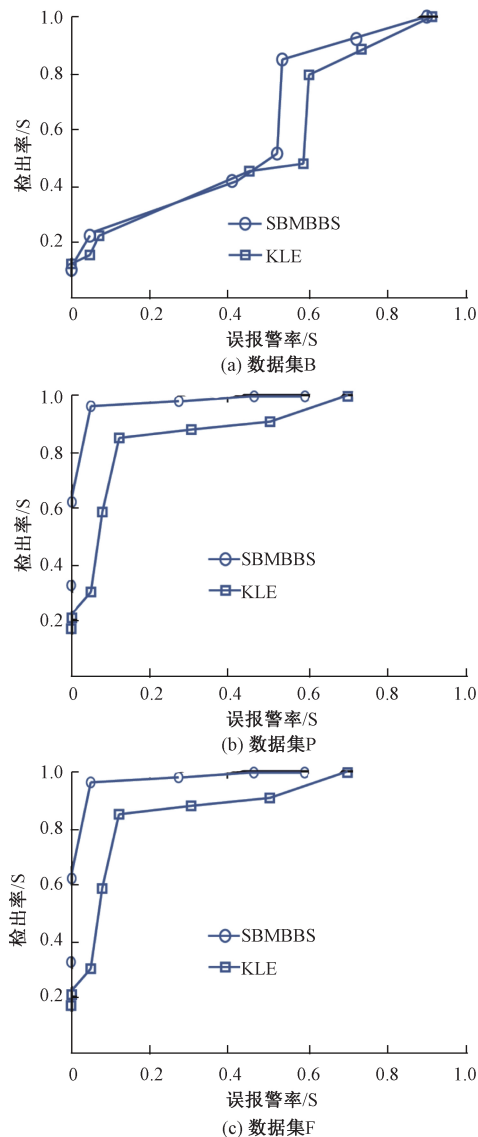


图4 SBMBBS和KLE算法对实测数据的测量结果和测量性能

4.2 模拟实验与分析

1) 实验方法

为了保证模拟实验的最大真实性,得到受控条件下最接近真实的海洋航道测量误差矩阵。本文在表1的基础上,主要通过以下几个步骤实现误差矩阵的人工合成,具体如下:

(1)通过小波变换从矩阵中的OD测量误差中,对其中的周期性测量误差进行抽取。本文对OD测量误差的小波分解是通过db5小波实现的,通过小波变换本文能够得到尺度函数系数向量,随后对算法单支进行小波重构得到低频信号,实现对高频信号地有效过滤。

(2)将零均值高斯噪声加入到上一步得到的矩阵中的全部OD测量误差中,进而得到了基准测量误差矩阵,该矩阵中不存在异常。

(3)结合步骤(2)得到的基准测量误差矩阵,在其中加入各种典型异常。

按照上述步骤能够实现对F数据集OD1测量误差的处理,最终结果如图5所示。

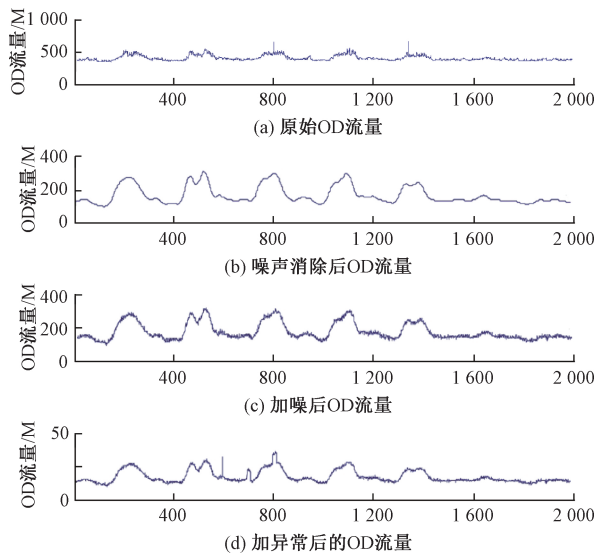


图5 人工合成测量误差矩阵的3个步骤

2) 测量性能

以表1中F数据集作为基础,实现测量误差矩阵的人工合成,进而向其中加入4种测量误差异常。误差异常注入需要按照一定的规则进行,即从1~500时刻注入10组alpha异常,并且对每组持续30 min,并且保证 $\delta = 0.5$,其中的源-目的OD数为(1,1),异常形状函数表现为阶跃函数特征;在随后的第501~1000时刻注入10组DDoS异常,持续与上一异常一致,取范围 $0.4 \leq \delta \leq 0.5$,涉及源-目的OD数为(5,1),异常形状函数表现为斜坡函数;随后的第1101~1150时刻则注入1组flash crowd异常,其持续时间与前述不同250 min,取范围 $0.2 \leq \delta \leq 0.5$,其涉及源-目的OD数为(5,1),异常形状函数也是斜坡函数;在第1981~2010时刻加入1组ingress/egress shift异常,持续

150 min,取值 $\delta = 0.8$, 涉及源-目的 OD 数为(1,1),异常的形状函数与 alpha 异常的一致都为阶跃函数。分别采用 SBMBBS 与 BSA 算法对误差矩阵进行有效测量。SBMBBS算法主要是通过小波变换与 Shewart 控制图实现的,图 6 所示为其测量结果和性能展示,通过分析能够得出该算法性能是优于 BSA 算法的,SBMBBS 算法能够在误差率为 0.2 时,获得 0.9 的测量率。

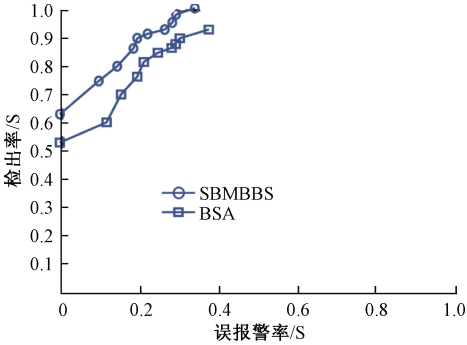


图 6 SBMBBS 和 BSA 算法对模拟实验数据的测量结果和测量性能

在表 1 中 F 数据集基础上能够得到人工合成测量误差矩阵,在第 501~1 000 时刻注入 10 组 DDoS 攻击异常,保证 30 min 的异常持续时间,并且使得异常测量误差增加值是原来 OD 测量误差均值的 50%,也就是取值 $\delta = 0.5$,其涉及源-目的 OD 数为(5,1),形状函数表现为阶跃函数。同时采用 SBMBBS 算法与在线 SBMBBS 算法对矩阵进行测量。对这两种算法而言,其确定的平滑指数都为 0.3,在线算法确定的滑动窗口长度为 2^9 ,如图 7 所示为两种算法得到的测量结果,以及其各自的性能结果。对比分析可得,在线 SBMBBS 算法与 SBMBBS 算法在测量性能方面是较为一致的,也就是两种算法在测量性能方面十分接近。在线 SBMBBS 算法在 0.25 的误报率下能够得到的测量率为 0.8。

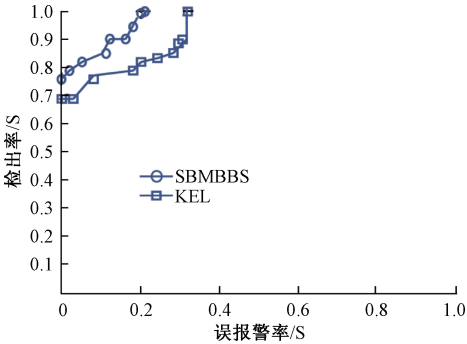


图 7 SBMBBS 和在线 MSBSA 算法对模拟实验数据的测量结果和测量性能

按照相同的做法能够得到测量误差合矩阵,和上述不同的是,对该矩阵采取 SBMBBS 算法与 KLE 算法,对其进

行测量,进而对两种算法的结果和测量性能进行很好的对比分析。结果表明 SBMBBS 具有更好的测量性能,这与其对小波变换的应用以及其控制图的运用有关系。

5 结 论

当前在异常测量方面采取的方法系统更多的是对测量误差的时间相关性或是空间相关性进行单一方面的考虑,缺乏对两者的同时考虑,为了有效改善这一状况,本文提出了单波束多波束测深系统,对误差矩阵的时空相关性都进行了充分考虑,并且在测量系统中充分运用了小波变换方法以及 BSA 在降维方面的能力,在对残余测量误差进行分析时,选择了两种控制图方法,即综合利用了 Shewart 与 EWMA 控制图,充分发挥了两种控制图在差异误差测量方面具有的优势,由此得到了基于 SBMBBS 的海洋航道测量。而且将滑动窗口机制与该算法系统有效结合起来,实现了该系统的海洋航道测量。经过海洋航道测量数据分析以及模拟实验,对于各算法性能进行了对比分析,结果表明,和 BSA、KLE 算法相比,SBMBBS 算法具有更好的测量性能。

参考文献

[1] LEE H Y, KIM W, KOO N H, et al. Resolution analysis of shallow marine seismic data acquired using an airgun and an 8-channel streamer cable[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 105:203-212.

[2] LUHURBUDI E C, PULLIAM J, AUSTIN J A, et al. Removal of diurnal tidal effects from an ultra-high-resolution 3-D marine seismic survey on the continental shelf offshore New Jersey[J]. Geophysics, 1998, 63(3):1036-1040.

[3] GRAS M, ROEL B A, COPPIN F, et al. A two-stage biomass model to assess the English Channel cuttlefish (*Sepia officinalis* L.) stock[J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71(9):2457-2468.

[4] SMYTH T, ATKINSON A, WIDDICOMBE S, et al. The western channel observatory [J]. Progress in Oceanography, 2015, 137:335-341.

[5] HENKEL L A, NEVINS H, MARTIN M, et al. Chronic oiling of marine birds in California by natural petroleum seeps, shipwrecks, and other sources[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 79(1-2):155-163.

[6] GALES J A, LEAT P T, LARTER R D, et al. Large-scale submarine landslides, channel and gully systems on the southern Weddell Sea margin, Antarctica[J]. Marine Geology, 2014, 348:73-87.

[7] SAEY T, ISLAM M M, SMEDT P D, et al. Using a multi-receiver survey of apparent electrical conductivity to reconstruct a Holocene tidal channel in

- a polder area[J]. Catena, 2012, 95(1):104-111.
- [8] ELVENES S, DOLAN M F J, BUHL-MORTENSEN P, et al. An evaluation of compiled single-beam bathymetry data as a basis for regional sediment and biotope mapping[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 71(4):867-881.
- [9] BABONNEAU N, DELACOURT C, CANCOU T R, et al. Direct sediment transfer from land to deep-sea: Insights into shallow multibeam bathymetry at La Réunion Island[J]. Marine Geology, 2013, 346:47-57.
- [10] UCHIDA, MASAO. Multibeam bathymetric and sediment profiler evidences for ice grounding and crater on the Chukchi and Beaufort borderland, Arctic Ocean[J]. Quaternary International, 2012, 279-280: 506-507.
- [11] 赵阳. 多波束测深系统在海洋航道测量中的应用研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(36):51-52.
- [12] 杨海忠. 基于多波束测深系统的天津某航道测量研究[J]. 科技创新导报, 2018, 15(7):80-81.
- [13] 王利锋, 蒋新华, 王冰, 等. 多波束测深系统在航道测量中的关键问题探讨[J]. 海洋测绘, 2014, 34(5):55-58.
- [14] 张旭, 叶小心, 洪德玫. 多波束系统在长江航道测量中的测线布设方法研究[J]. 中国水运. 航道科技, 2017(1):52-55.
- [15] 田天文, 别向华, 徐耀红, 等. 多波束测深系统在水下沉船特征分析中的应用[J]. 中国水运. 航道科技, 2017(5):52-56.
- [16] 温丹昊, 刘志高. 基于 CPCI 总线的相控阵雷达波束调度系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(4): 60-63.
- [17] 马超, 乔纯捷, 王跃科, 等. 水下监测系统中水平指向性噪声实时测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6):610-616.
- [18] 鲍骏, 郭爱煌. 波束成形在水声定位中的应用[J]. 电子测量技术, 2014, 37(11):42-45.

作者简介

王文杰, 本科、助理工程师, 主要从事海洋测绘相关工作。
E-mail: wpyzb1@163.com