

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.01.013

# 利用 TERCOM 与 ICCP 进行联合重力匹配导航

邹嘉盛<sup>1,2</sup>, 肖云<sup>1,3</sup>, 孙爱斌<sup>1,2</sup>, 韦建成<sup>4</sup>, 孟宁<sup>1,2</sup>, 艾尚校<sup>1,2</sup>

(1. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054;

2. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054;

3. 西安测绘研究所, 西安 710054;

4. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068)

**摘要:**重力匹配导航算法对提高匹配效率和精度具有重要意义,是水下匹配导航技术的热点问题。对已有的重力辅助惯性匹配导航算法开展了研究,在此基础上提出了一种新的基于 ICCP 与 TERCOM 相结合的重力匹配导航算法。该算法在已有改进算法的基础上,对惯性导航提供的采样间隔航距以及 ICCP 匹配航距,和改进 TERCOM 匹配航距进行了联合对比分析。通过设置限差,搜索出 TERCOM 匹配误差较大点,并用 ICCP 对应匹配点进行替换,反复搜索和替换,最终生成由两种算法结合的新匹配轨迹。在 TERCOM 匹配初始误差较小的情况下,该方法对 TERCOM 算法匹配精度的提升依赖于 ICCP 匹配结果。仿真结果表明:对于 TERCOM 出现明显误匹配且 ICCP 匹配结果较好时,该算法可大大提高重力匹配精度,距离误差由 2000m 降至 870m, X 轴方向由 TERCOM 匹配平均误差的 1370m 降至 530m, Y 轴方向由 TERCOM 匹配平均误差的 1900m 降至 640m,从而更好地满足了水下导航的需求。

**关键词:**ICCP 算法;TERCOM 算法;修正;替换;采样间隔

中图分类号:P223

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2095-8110(2021)01-0115-10

## Gravity Matching Navigation Technology Based on Integration of TERCOM and ICCP

ZOU Jia-sheng<sup>1,2</sup>, XIAO Yun<sup>1,3</sup>, SUN Ai-bin<sup>1,2</sup>, WEI Jian-cheng<sup>4</sup>, MENG Ning<sup>1,2</sup>, AI Shang-xiao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China;

2. School of Geology Engineering of Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;

4. The 20<sup>th</sup> Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** Gravity matching navigation algorithm is of great significance for improving matching efficiency and accuracy and is a hot issue of underwater matching navigation technology. In this paper, based on the study of the existing gravity-aided inertial navigation algorithm, a new gravity matching navigation algorithm based on ICCP and TERCOM is proposed. This algorithm makes a joint comparative analysis of the sampling interval distance provided by inertial navigation, the ICCP matched distance and the improved TERCOM matched distance on the basis of existing im-

收稿日期:2019-07-01;修订日期:2019-08-29

基金项目:国家自然科学基金(41374083,61427817)

作者简介:邹嘉盛(1994-)男,硕士研究生,主要从事重力辅助惯性匹配导航方面的研究。E-mail:18720988001@163.com

通信作者:肖云(1975-),男,博士,高级工程师,主要从事卫星重力方面的研究。E-mail:2262164268@qq.com

proved algorithm. It sets the tolerance, searches for some larger TERCOM match error points which are then replaced with ICCP corresponding match points, after repeated searching and replacement, a new matching track by the combining of two algorithms is finally generated. When the initial error of TERCOM matching is small, the improvement of the matching accuracy of TERCOM algorithm depends on the ICCP matching results. Simulation results show that in the case of obvious mismatching in TERCOM and good ICCP matching result, the algorithm can greatly improve the gravity matching accuracy. The distance error decreases from 2000m to 870m, the X-axis direction decreases from 1370m of TERCOM matching average error to 530m, and the Y-axis direction decreases from 1900m of TERCOM matching average error to 640m, which can better meet the requirements of underwater navigation.

**Key words:** ICCP algorithm; TERCOM algorithm; Revise; Substitute; Sampling interval

## 0 引言

目前,对于海洋科学探测和海洋开发利用的水下自主航行器而言,水下导航与定位技术能够提供满足需求的高精度速度、姿态、位置等信息。而潜艇作为军事力量的重要手段之一,科学实验航行器具备的水下导航精度无法满足潜艇长航时、长航距、高隐蔽性的要求。目前,水下导航定位方式主要包括惯性导航、声学定位以及导航和海洋地球物理定位与导航等。其中,惯性导航是最为主要的自主导航方式之一,因为惯性导航可以输出全面的导航信息,其主要原理是通过内部惯性敏感元件对水下载体相对于惯性空间的线运动和角运动参数进行测量,在给定的运动初始条件下,如经纬度和速度信息,解算出水下载体的姿态、方位和位置等信息。惯性导航具有精度高、可靠性强、基本不受外界干扰等优势,但在轨迹解算和定位解算时,系统误差随着时间积累不断扩大,这就需要一些辅助匹配定位技术对惯性导航的激烈误差进行修正。由于海洋重力场特征稳定且匹配定位精度较高<sup>[1-3]</sup>,利用地球重力场辅助水下载体惯性导航是水下自主导航的重要研究趋势<sup>[4-6]</sup>。

童余德等提出了基于局部重力图逼近的组合匹配算法,利用二维高斯基函数对局部离散格网重力异常图进行逼近以获取其解析表达式,利用地形轮廓匹配(Terrain Contour Matching, TERCOM)选择最优轨迹,最后利用迭代更新轨迹,控制了误差范围,缩小了误匹配的最大距离<sup>[7]</sup>;蒋东方等提出了在具有统一解析式连续背景场的基础上实现迭代最近等值线(Iterated Closest Contour Point, ICCP)的匹配算法,建立了局部连续背景场的最近

点搜索模型,采用BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)拟牛顿方法实现了置信范围内最近等值点的精确定位<sup>[8]</sup>;王志刚等提出了将匹配位置误差作为观测量,利用Kalman滤波对惯导系统误差进行最优估计,以验证ICCP算法位置是否可用于修正惯导误差<sup>[9]</sup>;蔡龙飞等采用固定初始序列长度的方式对算法结构进行改善,并推导出单点迭代公式,同时采用滑动窗搜索方式缩小搜索范围以提高搜索速度<sup>[10]</sup>;王胜平等提出了联合TERCOM与ICCP的水下地磁匹配导航新方法,对粗匹配和精匹配进行分析,通过改进ICCP算法,解决了传统匹配算法速度、精度以及完备性不能兼得的问题<sup>[11]</sup>。以上文献对传统TERCOM以及ICCP算法做出了多项理论改进,但忽略了惯导在短时间、短航距上可提供高精度导航的特性。

ICCP算法较好地保持了匹配轨迹空间位置关系的整体性,TERCOM算法则更加注重轨迹重力异常值的序列一致性。本文通过对比分析惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)采样间隔航距以及两种匹配算法的匹配航距,有效找出改进型TERCOM匹配点存在的明显匹配异样点,并用ICCP匹配点进行替换,从而联合两种算法的匹配结果点进行择优录取。实验结果表明:在ICCP自身匹配误差不大的前提下,以均方差匹配作为主要匹配结果,根据一系列判断方式,择优选取两种匹配算法点生成一条由均方差匹配点与ICCP迭代点组合而成的新匹配轨迹,有效提高了匹配精度。

## 1 现有重力匹配算法分析

重力匹配INS是利用地球重力场特性,在高分辨率的重力异常图组成的基本特性信息数据库

中<sup>[12]</sup>,结合 INS 提供的实时输出位置以及海洋重力仪提供的实测值,按照一定的匹配算法对惯导位置进行修正,以实现高精度水下定位的一种导航技术。系统原理结构图<sup>[13]</sup>如图 1 所示。

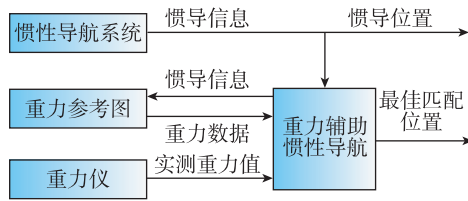


图 1 重力匹配算法原理图

Fig. 1 Gravity matching algorithm schematic

1.1 TERCOM 工作原理

在地球陆地表面上不同位置的重力值通常是不同的,对于海面上任意位置的地理坐标,都可以根据其周围重力场的等值线或者重力场分布单值进行确定<sup>[14]</sup>。在匹配区域中,测量若干重力值,由惯导系统的位置信息和误差信息在已有的数字重力图上确定搜索区域,将重力值序列和相关区域按一定的算法进行相关分析,所得的相关极值点对应的位置就是潜艇的航行位置,进而修正主导航系统的导航参数<sup>[15]</sup>。

常用的 TERCOM 算法有均方差算法、平均绝对差算法以及交叉相关算法。

均方差算法

$$J_{MSD} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (X(i) - g_k(i))^2, \quad k=1,2,\dots,s \quad (1)$$

平均绝对值算法

$$J_{MAD} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |X(i) - g_k(i)|, \quad k=1,2,\dots,s \quad (2)$$

交叉相关算法

$$J_{COR} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X(i)g_k(i), \quad k=1,2,\dots,s \quad (3)$$

其中,  $g_k$  表示第  $k$  条匹配轨迹的重力值;  $X(i)$  表示重力仪的实测值。三种算法对于最优匹配结果,一般要求平均绝对差算法和均方差算法的计算结果应该为最小,而交叉互相关算法所得结果最大。

为了更加精确地搜索每个待匹配点的真实坐标,本文对传统的 TERCOM 匹配算法进行改进,利用滑动窗口搜索模式,根据惯性导航误差随时间积累的情况,分别对不同采样时间的采样点的搜索范

围进行重新定义,其搜索区域随航行距离的增加而增加,并在相应搜索范围内寻找实测重力等值点,随后进行按序列的随机连线,生成  $N_1 \times N_2 \times \dots \times N_i$  条待匹配轨迹,将初始匹配点的误差控制在较小范围内,如图 2 所示,利用上述相关性分析求取最佳匹配轨迹。该改进算法有效保证了匹配初期的匹配精度,充分考虑了单点匹配情况。

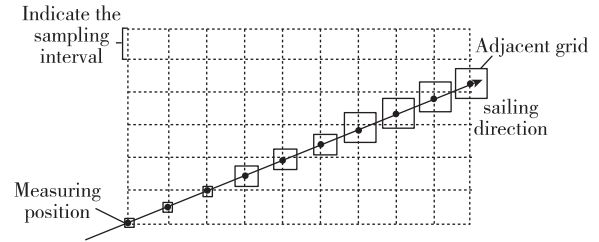


图 2 改进 TERCOM 搜索区域

Fig. 2 Improved TERCOM searching area

1.2 ICCP 工作原理

ICCP 算法是一种基于刚性变换(旋转和平移)的反复接近最近等值线点的算法,通过将重力测量点变换到与之最近的等值线点,并利用这些点构成估计航迹,不需要事先确定对应点,而是利用算法不断重复运动变换—确定对应关系—求运动变换的过程,逐步改进运动的估计,进而校正惯导误差。如图 3 所示,算法在重力图上缺乏明显图形特征的情况下比较适用,而重力仪的最小感量、重力图的网格间距和数据密度对导航定位精度具有较大影响<sup>[16-17]</sup>。算法具体步骤如下<sup>[18]</sup>:

1)对每一个指示航迹点  $P_i$  在测量重力值对应的重力等值线  $C_i$  上寻找最近点,记为  $Y_i$ ;

2)求解刚性变换  $T$ ,使得集合  $Y = \{Y_i; i=1, \dots, N\}$  和  $P = \{P_i; i=1, \dots, N\}$  之间欧式距离最小,即  $M(Y, TP) = \sum_{i=1}^N \|Y_i - TP_i\|$ ;

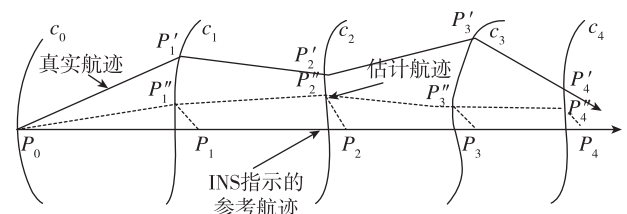


图 3 ICCP 匹配算法基本原理

Fig. 3 Basic principles of ICCP matching algorithm

3)将集合  $P$  变换到  $TP$ ,将新的集合  $TP$  作为起始集合进行下一步迭代,直至收敛即  $T$  停止显著变化;

4)经过收敛迭代后获得的集合  $TP$  即为最终的匹配航迹。

ICCP 算法有很多终止标准,如:1)旋转和平移的增量都小于门限值;2)旋转和平移的绝对值都小于门限值;3)残差变化量小于门限值<sup>[19]</sup>。

## 2 ICCP 辅助 TERCOM 修正算法

TERCOM 算法充分利用潜器携带的重力仪实测数据,与所在区域的重力底图进行配准,采用轨迹多点采样,根据底图栅格数据点寻找与实测轨迹重力异常数据序列的最佳匹配序列,反算其最近格网对应坐标,以得到最终航迹坐标。TERCOM 算法包括均方差匹配、平均绝对差匹配以及交叉相关匹配。本文采用滑动窗口搜索模型,分别以每个采样点为搜索半径设定搜索范围,并搜索范围内的等值点,依次进行随机连线,生成  $N$  条待匹配轨迹。对于最佳匹配结果,一般要求平均绝对算法和均方差算法的计算结果应该为最小,而交叉相关算法所得结果最大。三种算法重点考虑了重力异常值的对应关系,但忽略了潜艇运行轨迹带来的空间几何位置关系,在实际匹配过程中,由于重力仪自身存在的仪器测量误差,且重力底图数据也存在误差,同时还存在因栅格分辨率导致的精度误差,因此经常出现较为明显的误匹配现象,如图 4 所示,其中 2 个采样点出现了较为明显的匹配误差,不可作为有效匹配点。本文涉及的轨迹匹配图均采用东北天坐标系,其中  $X$  轴指向为东, $Y$  轴指向为北。

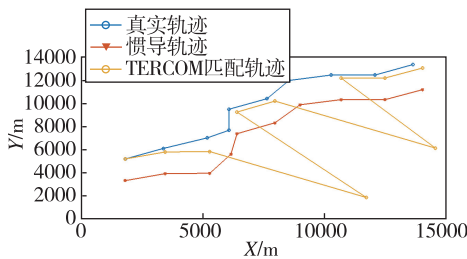


图 4 均方差匹配

Fig. 4 Mean variance matching

相比于 TERCOM 匹配在空间位置关系上的不足,ICCP 算法则在这方面具有较强的优势,仅在每次迭代初期利用重力异常值寻找底图相应等值线,随后利用空间位置关系进行旋转和平移,从而有效

地保障了整条轨迹的一致性和整体性。但 ICCP 匹配对惯导精度要求较高,受影响因素较多,在多数情况下匹配效果低于 TERCOM 算法。因此,本文结合 TERCOM 算法在整体匹配中的高精度特点和 ICCP 算法在匹配轨迹中的整体结构性特点,以 TERCOM 匹配结果为主,ICCP 匹配结果为辅,综合两者的匹配结果。首先利用惯导轨迹提供的相邻采样点间的航迹的,与对应航迹的 TERCOM 匹配结果进行对比,通过分析采样点两侧航距,寻找出可疑错误匹配点,以及均方差匹配结果明显异常点,用 ICCP 匹配结果点进行替换,经过多次循环对比、分析和替换,从而生成一条新的、基于两种匹配算法联合的轨迹点。详情如下:

1)计算 INS 轨迹中每个采样间隔的航距,同时计算均方差匹配和 ICCP 匹配中每个采样间隔的航距。

$$d_{INS_i} = \sqrt{(IN_{X_{i+1}} - IN_{X_i})^2 + (IN_{Y_{i+1}} - IN_{Y_i})^2} \quad (4)$$

$$d_{TER_i} = \sqrt{(TER_{X_{i+1}} - TER_{X_i})^2 + (TER_{Y_{i+1}} - TER_{Y_i})^2} \quad (5)$$

$$d_{ICCP_i} = \sqrt{(IC_{X_{i+1}} - IC_{X_i})^2 + (IC_{Y_{i+1}} - IC_{Y_i})^2} \quad (6)$$

2)对均方差匹配结果进行分析。设置限差,分析从第 2 个采样间隔点到第  $N-1$  个采样间隔点之间的航距,选取采样间隔点在上一时刻航距异常、下一时刻航距正常的点,用 ICCP 对应采样点进行赋值替换,否则保留均方差匹配结果点。

$$MA(X_k, Y_k) = ICCP(X_k, Y_k) \quad (7)$$

3)重新计算由步骤 2)结果更新后的新轨迹的每段采样间隔航距。

4)对新轨迹进行分析。设置限差,分析从第 2 个采样间隔点到第  $N-1$  个采样间隔点之间的航距,选取采样间隔点在上一时刻航距异常、下一时刻航距也异常的点,用 ICCP 赋值对应采样点进行赋值替换,否则保留均方差匹配结果点。

$$MA(X_t, Y_t) = ICCP(X_t, Y_t) \quad (8)$$

5)分别计算均方差和 ICCP 匹配算法的最后一个采样点与步骤 4)的第  $N-1$  个采样点之间的距离,将 2 个距离结果与 INS 最后采样航距段进行对比,选择更接近惯导航距的点作为改正替换点。

$$d_1 = \left| \sqrt{(IC_{X_N} - MC_{X_{N-1}})^2 + (IC_{Y_N} - MC_{Y_{N-1}})^2} - d_{INS_N} \right| \quad (9)$$

$$d_2 = \sqrt{(TER_{X_N} - MC_{X_{N-1}})^2 + (TER_{Y_N} - MC_{Y_{N-1}})^2} - d_{INS_N} \quad (10)$$

$$MA(X_N, Y_N) = ICCP(X_N, Y_N) (d_1 < d_2) \quad (11)$$

$$MA(X_N, Y_N) = TER(X_N, Y_N) (d_1 > d_2) \quad (12)$$

6)重新计算由步骤 5)结果更新后的新轨迹的每段采样间隔航距。

7)计算步骤 6)所得轨迹采样间隔航距与惯导

轨迹对应航距的差,同时获取 TERCOM 航距与惯导轨迹对应航距的差,选择更为接近惯导航距的点作为更新后轨迹点。

$$d_3 = |d_{MA_i} - d_{INS_i}| \quad (13)$$

$$d_4 = |d_{TER_i} - d_{INS_i}| \quad (14)$$

$$MA(X_i, Y_i) = TER(X_i, Y_i) (d_3 > d_4) \quad (15)$$

8)重复步骤 4)得到最终轨迹。流程图如图 5 所示。

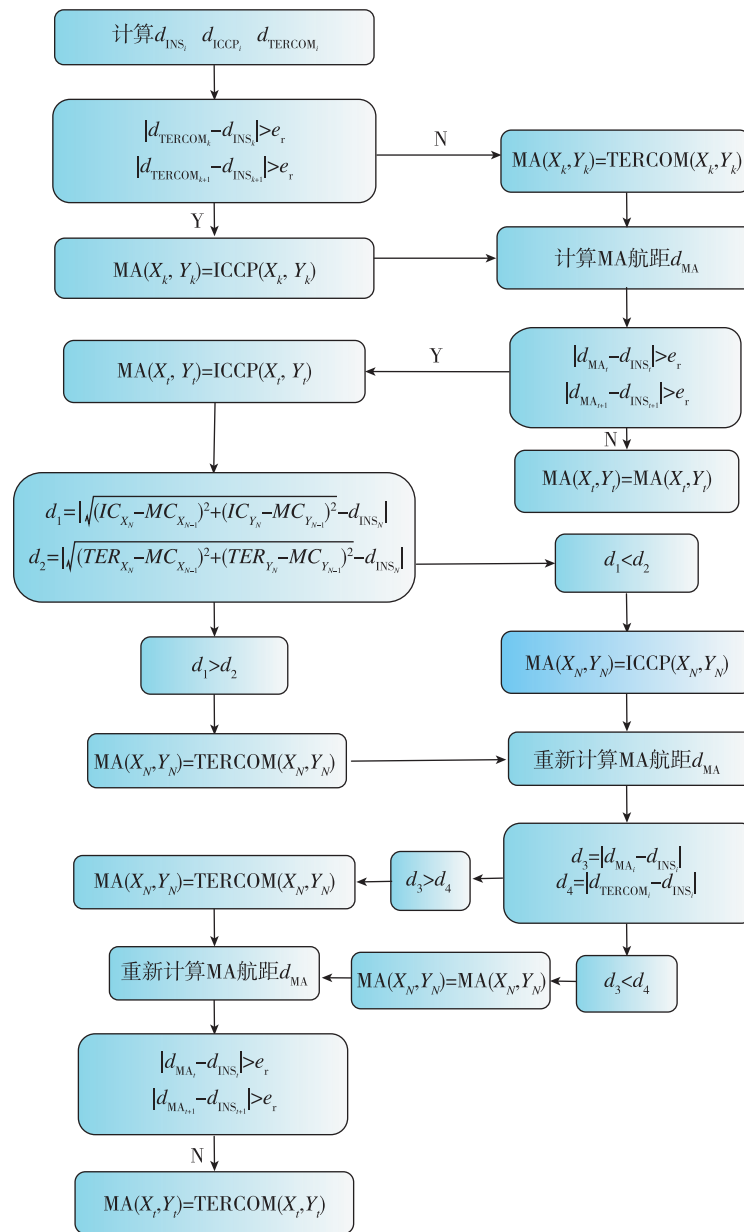


图 5 本文新匹配算法流程图

Fig. 5 New matching algorithm flow charts



### 3 仿真实验分析

本文采用 MATLAB 进行编程仿真实验,重力异常分辨率为  $1' \times 1'$ ,假定水下潜艇以 10m/s 的速度航行,实验一海域位于某海域,如图 6 所示,采样间隔为 3min 一个采样点,单次匹配以 10 个采样间隔点航迹为一次匹配。匹配实验分别采用 TERCOM 均方差

匹配和 ICCP 算法匹配,其中 ICCP 算法迭代限值条件为迭代次数超过 100 次或相邻迭代坐标平均变化不超过 10m。随后利用本文提及的综合算法,限差为二分之一的底图分辨率,综合均方差匹配以及 ICCP 算法匹配结果点中误差较小的点生成一条新的匹配轨迹。

实验一匹配结果如图 7 所示。

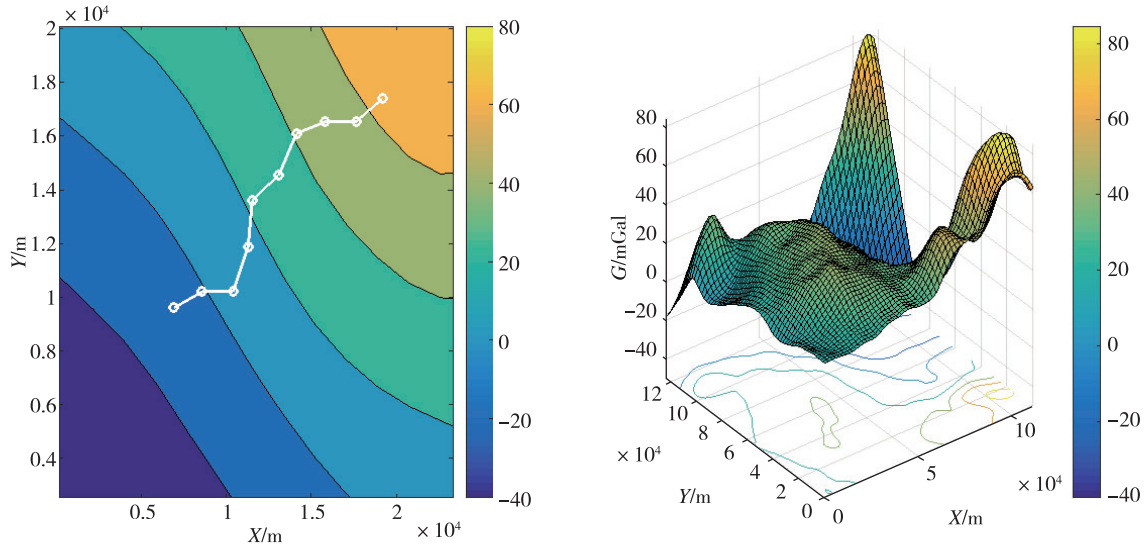


图 6 实验一重力异常背景图

Fig. 6 Gravity anomaly background of experiment one

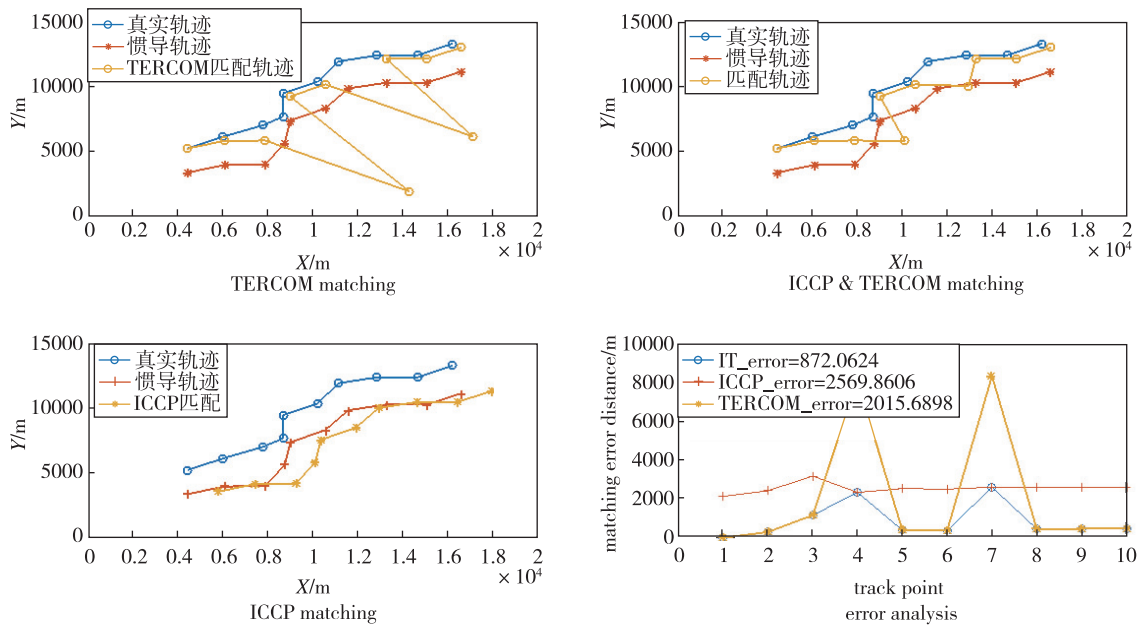


图 7 实验一匹配结果

Fig. 7 Matching results of experiment one

如图 7 所示,均方差匹配总体结果较好,但在第 4 和第 7 个采样点出现明显匹配误差,超过 7km,导致平均误差范围达到 2015m。误差原因是由对应惯导点为搜索半径的区域内出现与重力仪实测数据相同点,导致误差点符合均方差匹配算法,但不符合实际潜艇运动轨迹在限定速度与限定时间情况下的理论航距。利用本文所述组合定位方法,实

现了 X、Y 方向平均误差由 1 个格网精度降至三分之一个格网精度,如表 1 所示,最小值均实现了最优选择,误差均方差由 km 级降至百 m 级。因此,借助 ICCP 匹配结果点,有效修正了 TERCOM 均方差匹配误差,从而提高了匹配精度,降低了匹配误差,使得平均误差降至 872m。

表 1 三种匹配算法误差

Tab. 1 Three matching algorithm errors

		误差统计/m			
		最大值	最小值	平均值	均方差
Y	TERCOM	5792.1540	2.0030	1982.5572	2312.4600
	ICCP	2838.7910	1668.1842	1428.4547	312.4730
	TERCOM&ICCP	1894.8082	2.0030	648.8896	717.7821
X	TERCOM	6019.1999	8.0299	1370.9089	2355.8108
	ICCP	1817.3798	1356.7787	1619.7700	172.4366
	TERCOM&ICCP	1817.3798	8.0299	530.6093	602.7190

实验二选择重力异常变化较缓区域,海域重力场背景图如图 8 所示,潜艇航行于重力异常起伏变化缓

慢区域,同样采用采样时间间隔 3min,航速 10m/s 的轨迹线,每 10 个采样点进行一次匹配修正。

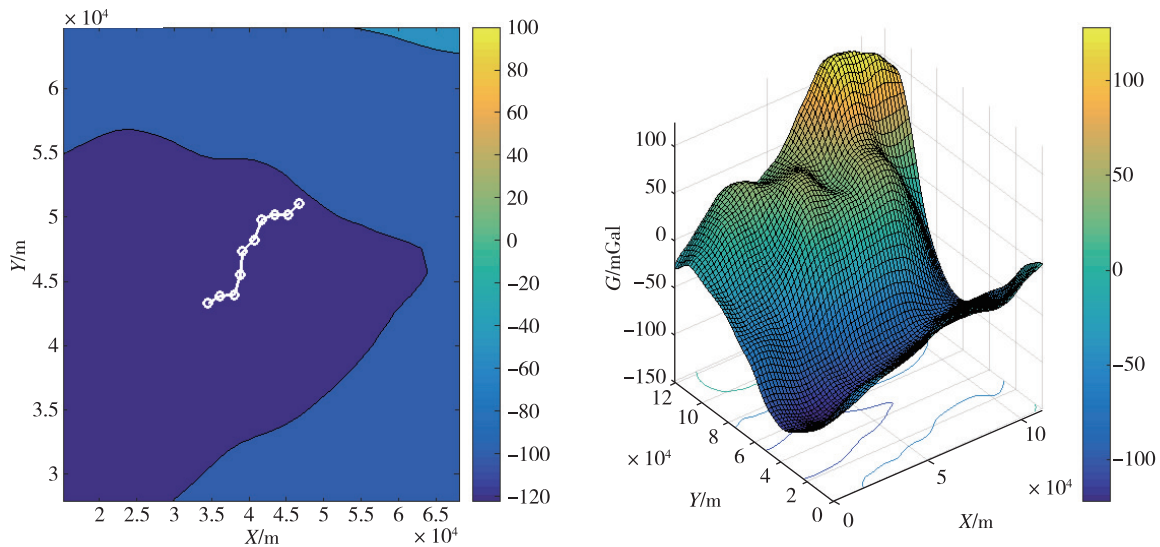


图 8 实验二重力异常背景图

Fig. 8 Gravity anomaly background of experiment two

实验二匹配结果如图 9 所示,由于潜艇航行于重力异常变化不明显区域,导致 TERCOM 匹配结果出现多处明显错误。从轨迹误匹配的航距角度分析,已不再与实验一中出现的情况类似,由简单

的单点误匹配变成了多点连续误匹配。

如图 9 所示,由于轨迹处于重力异常图特征性标准差较小区域,所以均方差匹配效果不佳,平均误差达到了 2200m。第 2、第 6 和第 7 个轨迹点出

现了较大匹配误差,但 ICCP 算法匹配效果整体较好,平均误差仅为 797m,远低于均方差误差,其中的第 1,第 3~第 5 个点匹配误差略低于均方差匹配,其他点均优于均方差匹配,如表 2 所示。通过本文提出的综合判断方式,择优最佳点,分别选取了 X、Y 方向的最小值,同时最大值均不超过传统

TERCOM 和 ICCP 最大值, X、Y 方向平均误差较 TERCOM 有显著下降,分别由 X 向的 1900m 下降至 540m, Y 向的 770m 下降至 160m,实验说明综合判断方式提高了匹配精度,实现了由 km 级降至百 m 级的误差效果,综合误差为 624m。

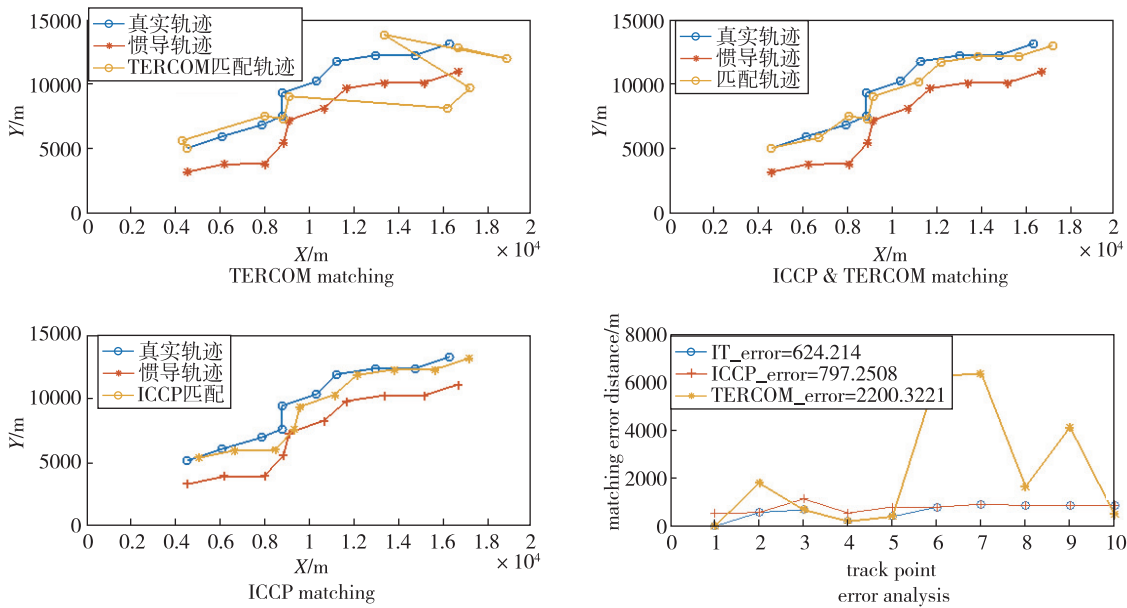


图 9 实验二匹配结果

Fig. 9 Matching results of experiment two

表 2 三种匹配算法误差

Tab. 2 Three matching algorithm errors

		误差统计/m			
		最大值	最小值	平均值	均方差
Y	TERCOM	2082.1535	2.0021	772.2765	816.0693
	ICCP	981.1272	11.6642	175.4514	287.6545
	TERCOM&ICCP	682.5330	2.0021	162.9870	196.5037
X	TERCOM	6019.1940	8.0355	1911.8939	2470.9983
	ICCP	928.0689	493.0237	734.9701	160.75621
	TERCOM&ICCP	928.0689	8.0355	540.8512	375.3408

#### 4 结论

基于 TERCOM 算法在平均匹配精度上的优点以及 ICCP 算法在匹配轨迹整体一致性的特点,本文采用以均方差匹配结果点为主要匹配点,ICCP 匹配结果点为修正匹配点的方式,通过计算两种匹

配方法在每段采样间隔的航距,与惯性导航的对应航距进行比较,找出在均方差匹配结果中常出现的误匹配现象点,并用 ICCP 对应匹配结果点进行替换的联合匹配算法。

1)该算法能有效辨别出 TERCOM 匹配中出现的较为明显的错误匹配点,并通过替换的方式减小



匹配误差,降低了整体匹配轨迹的平均误差,由 km 级降至百 m 级。

2) 目前主流的水下重力匹配导航算法多以 TERCOM、SITAN、ICCP 三种为基础,依旧缺乏可同时吸取多种算法优点,降低各种算法自身缺陷的新算法。

3) 本文虽在一定程度上有效降低了 TERCOM 匹配误差,但对于匹配误差实现数量级程度的修正仍然不够,同时对 TERCOM 初始匹配以及 ICCP 整体匹配精度较高,需要在今后的工作中继续加大研究。

### 参考文献

- [1] Rice H, Mendelsohn L, Aarons R, et al. Next generation marine precision navigation system[C]// Proceedings of Position Location and Navigation Symposium (Cat. No. 00CH37062). San Diego, CA. IEEE 2000, 2000: 200-206.
- [2] Qin Z, Bian X, Shi X, et al. Simulation platform of gravity aided inertial navigation system for underwater vehicle[J]. Geomatics and Information Science of Wunan Universtiy, 2008, 33(7): 755-758.
- [3] Yi C, Xiu C B, Jing L. The simulation of ICCP algorithm in the gravity aided navigation[C]//Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems. IEEE, 2009: 62-65.
- [4] Wu L, Wang H, Chai H, et al. Research on the relative positions-constrained pattern matching method for underwater gravity-aided inertial navigation[J]. Journal of Navigation, 2015, 68(5): 937-950.
- [5] Shuai X, Wu S C, Luo N B. The dynamic TERCOM algorithm of underwater positioning based on terrain entropy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 644-650: 1774-1777.
- [6] Zhao L, Gao N, Huang B, et al. A novel terrain-aided navigation algorithm combined with the TERCOM algorithm and particle filter[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 1124-1131.
- [7] 童余德, 边少锋, 蒋东方, 等. 一种新的基于局部重力图逼近的组合匹配算法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2917-2924.
- Tong Yude, Bian Shaofeng, Jiang Dongfang, et al. A new integrated gravity matching algorithm based on approximated local gravity map[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 2917-2924(in Chinese).
- [8] 蒋东方, 童余德, 边少锋, 等. ICCP 重力匹配算法在局部连续背景场中的实现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(10): 1203-1206.
- Jiang Dongfang, Tong Yude, Bian Shaofeng, et al. The study on ICCP algorithm for gravity matching based on local continuous field[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(10): 1203-1206(in Chinese).
- [9] 王志刚, 边少锋. 基于 ICCP 算法的重力辅助惯性导航[J]. 测绘学报, 2008, 37(2): 147-151.
- Wang Zhigang, Bian Shaofeng. ICCP algorithm for gravity aided inertial navigation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(2): 147-151(in Chinese).
- [10] 蔡龙飞, 郑彤. 基于 ICCP 算法的重力匹配仿真[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(12): 109-112.
- Cai Longfei, Zheng Tong. Gravity matching simulation of real-time ICCP algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(12): 109-112(in Chinese).
- [11] 王胜平, 张红梅, 赵建虎, 等. 利用 TERCOM 与 ICCP 进行联合地磁匹配导航[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1209-1212.
- Wang Shengping, Zhang Hongmei, Zhao Jianhu, et al. Marine geomagnetic navigation technology based on integration of TERCOM and ICCP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(10): 1209-1212(in Chinese).
- [12] 马越原, 欧阳永忠, 黄漠涛, 等. 基于重力场特征参数信息熵的适配区选择方法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(6): 763-768.
- Ma Yueyuan, Ouyang Yongzhong, Huang Motao, et al. Selection method for gravity-field matchable area based on information entropy of characteristic parameters[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(6): 763-768(in Chinese).
- [13] Wang H, Wu L, Chai H, et al. Characteristics of marine gravity anomaly reference maps and accuracy analysis of gravity matching-aided navigation[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1851.
- [14] 袁信, 俞济祥, 陈哲. 导航系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993: 205-225.
- Yuan Xin, Yu Jixiang, Chen Zhe. Navigation system[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993: 205-225(in Chinese).
- [15] 闫利, 崔晨风, 吴华玲. 基于 TERCOM 算法的重力匹配[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(3): 261-264.
- Yan Li, Cui Chenfeng, Wu Hualing. A gravity matching algorithm based on TERCOM[J]. Geomatics

- and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(3):261-264(in Chinese).
- [16] 闫利, 崔晨风, 谢洪. ICCP 算法在重力匹配中的应用[J]. 遥感信息, 2009(1): 16-19.  
Yan Li, Cui Chenfeng, Xie Hong. The application of ICCP algorithm to gravity matching [J]. Remote Sensing Information, 2009(1): 16-19(in Chinese).
- [17] Yuan G, Zhang H, Yuan K, et al. A combinational underwater aided navigation algorithm based on TERCOM/ICCP and Kalman filter [C]//Proceedings of International Joint Conference on Computational Sciences & Optimization. IEEE Computer Society, 2011: 952-955.
- [18] 王可东, 陈德. 水下地形匹配等值线算法研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(5): 995-999.  
Wang Kedong, Chen Si. Iterative closet contour point for underwater terrain-aided navigation[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(5): 995-999(in Chinese).
- [19] 彭富清. 海洋重力辅助导航方法及应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.  
Peng Fuqing. Marine gravity aided navigation methods with their applications[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2009(in Chinese).

(编辑: 孟彬)