

## 静轨光学卫星与自动识别系统的目标点迹关联与误差校正

刘 勇<sup>\*①</sup> 姚力波<sup>②</sup> 吴昱舟<sup>②</sup> 修建娟<sup>②</sup> 周智敏<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

<sup>②</sup>(海军航空大学信息融合所 烟台 264001)

**摘 要:** 静轨光学卫星对舰船目标监视时, 由于探测距离较远存在较大的目标定位误差, 影响后续目标跟踪的准确性。由于任务区域主要是海面, 可能无法找到地面控制点(GCP)进行坐标校正。为了提高无控下静轨光学卫星对舰船目标的定位精度, 同时实现多源数据的融合, 该文提出一种基于船舶自动识别系统(AIS)数据的静轨光学卫星舰船目标点迹关联与误差校正方法。利用有理多项式系数(RPC)模型实现物方坐标到像方坐标的转换, 通过迭代最近点(ICP)与全局最近邻(GNN)算法进行点迹关联, 由关联点对实现误差校正。利用高分 4 号卫星图像与 AIS 数据进行了实验, 实验结果表明该算法具有很高的关联正确率, 同时极大提高了定位精度, 基本可以满足实用性要求。

**关键词:** 静轨光学卫星; 自动识别系统; 数据关联; 误差校正

中图分类号: TN958; TP751

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)07-1546-07

DOI: 10.11999/JEIT170896

## Target Point Tracks Association and Error Correction with Optical Satellite in Geostationary Orbit and Automatic Identification System

LIU Yong<sup>①</sup> YAO Libo<sup>②</sup> WU Yuzhou<sup>②</sup> XIU Jianjuan<sup>②</sup> ZHOU Zhimin<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>②</sup>(Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** When ship target is monitored by the geostationary optical satellite, the positioning error is large due to the long distance between the target and the satellite, which affects the accuracy of the follow-up target tracking. As the monitoring area is mainly the ocean, it may not be possible to find the Ground Control Point (GCP) for coordinate correction. In order to improve the positioning accuracy of the geostationary optical satellite for ship without GCP, and to realize the fusion of multi-source data, a novel target point association and error correction with optical satellite in geostationary orbit and ship Automatic Identification System (AIS) is proposed. By means of the Rational Polynomial Coefficient (RPC) model, AIS coordinates are transformed into image coordinates. The Iterative Closest Point (ICP) and Global Nearest Neighbor (GNN) algorithm are combined and used for data association. Then, the error is corrected using the point pair of association. Experimental results using GF-4 images and AIS data verify the feasibility of the proposed method and show that the association algorithm has a high correlation rate, and the average positioning accuracy after error correction is improved greatly compared with the positioning accuracy before correction.

**Key words:** Geostationary optical satellite; Automatic Identification System (AIS); Data association; Error correction

### 1 引言

舰船目标监视具有重要的军事和民用意义, 已经广泛应用于海战场态势感知、海上交通监控、海

上营救搜索等领域<sup>[1]</sup>。空基、岸基等雷达以及自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)是舰船目标监视的传统手段。随着卫星技术的快速发展, 光学、合成孔径雷达(SAR)等卫星也开始用于舰船目标监视。其中, 静轨凝视光学卫星采用地球同步轨道, 极大地提高了卫星的时间分辨率与覆盖范围, 能够实现大范围内目标的连续、实时、长时间监视, 在舰船目标监视方面具有重大的应用潜力<sup>[2]</sup>。目前,

收稿日期: 2017-09-22; 改回日期: 2018-03-07; 网络出版: 2018-04-02

\*通信作者: 刘勇 xhliuyong@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(91538201)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (91538201)

我国的高分 4 号(GF-4)卫星是世界上分辨率最高(分辨率 50 m)的静轨光学卫星, 已经具备中、大型舰船目标的连续跟踪与监视能力<sup>[3]</sup>。然而, 静轨卫星距离目标较远, 星上 1 角秒的姿态误差就能造成地面几百米的定位误差。当卫星图像存在较大的目标定位误差时(如 km 量级), 会影响目标跟踪、多源数据融合等后续处理的准确性。目前, 卫星图像定位误差的校正主要是基于大量地面控制点(Ground Control Point, GCP)校正<sup>[4]</sup>或者地理信息系统匹配的方式<sup>[5]</sup>, 而当卫星用于海洋监视时, 探测区域主要是海面, 可能无法找到有效的 GCP 进行定位误差的校正。

AIS 是一种舰船导航辅助系统, 能够提供合作舰船目标精确的位置、身份属性等信息。目前, 采用 AIS 进行舰船目标监视的主要平台为岸基 AIS 与星载 AIS, 其中星载 AIS 不受地理限制, 可以实现大范围甚至全球海域的舰船目标监视。利用静轨光学卫星与 AIS 目标点迹的融合, 不仅可以有效提高舰船目标的探测范围及身份识别验证能力, 同时可以校正静轨光学卫星图像的定位误差。现有利用 AIS 关联的主要有岸基、舰载雷达<sup>[6-9]</sup>以及 SAR 卫星<sup>[10-12]</sup>, 关联方法主要有最近邻(Nearest Neighbor, NN)<sup>[6,10]</sup>、全局最近邻(Global Nearest Neighbor, GNN)<sup>[7,8]</sup>、神经网络<sup>[9]</sup>、点模式匹配<sup>[11]</sup>(也叫点集配准)、多特征最大似然<sup>[12]</sup>等。上述方法为静轨光学卫星和 AIS 点迹关联提供了一些方法借鉴和参考, 但是, 这些方法大多没有考虑到系统误差下的匹配问题。文献[6]考虑了雷达系统误差下的 AIS 关联, 但是虚假点迹等引起的航迹数目不一致会对 NN 关联带来影响, 在系统误差和虚假点迹存在下并不是最近的点就是要关联的点迹。点模式匹配方法可以较好解决系统误差下多源传感器关联, 如文献[11]中的一致性点漂移、形状上下文等方法, 但是计算复杂度较高, 无法用于大范围区域下的快速关联。

为了实现与 AIS 数据的快速关联, 同时提高在无 GCP 时静轨光学卫星对舰船目标的定位精度, 本文结合静轨光学卫星特点, 提出了一种静轨光学卫星与 AIS 舰船目标关联与校正方法。该方法将监视区域的 AIS 数据与静轨光学卫星的舰船检测结果进行关联, 再通过关联点对解算出误差模型参数, 实现静轨光学卫星定位误差的校正。

## 2 算法原理

本文的关联与误差校正流程如图 1 所示, 先利用静轨光学卫星图像相关的有理多项式系数(Rational Polynomial Coefficients, RPC)文件, 得

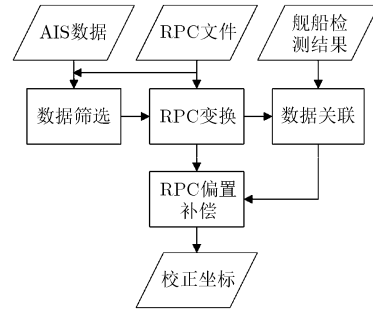


图 1 关联与误差校正框架

到卫星成像时间及大致的成像区域, 从而筛选出有用的 AIS 数据; 将 AIS 数据进行 RPC 逆变换, 实现物方坐标到像方坐标的转化; 将卫星图像的舰船检测结果与像方 AIS 数据进行数据关联, 采用迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)进行粗步匹配, 再利用 GNN 进行精准关联; 通过随机采样一致性(RANdom SAMple Consensus, RANSAC)从关联点对中筛选点对计算 RPC 模型像方误差的补偿参数, 由 RPC 正变换得到校正的目标坐标。

### 2.1 时空对准

静轨光学卫星与 AIS 在数据获取的时间与空间上存在差异, 为了进行点迹关联与误差校正, 需要进行时空对准处理。利用卫星图像的获取时间与大致的经纬度范围, 筛选出探测时间前后一段时间与空间区间的 AIS 数据, 通过舰船识别号将同一目标的数据按照时间顺序存储。对同一目标的 AIS 数据进行行线性内插与外推, 得到卫星图像数据获取时间对应的目标位置, 即物方坐标。卫星图像经过舰船目标检测后, 得到目标在遥感图像的位置, 即像方坐标。为了实现坐标的统一, 需要对其中一方坐标进行转换。考虑到后续卫星系统误差的校正处理, 本文利用 RPC 模型在像方进行坐标统一, 实现数据同步与匹配。同时, 在像方采用欧式距离计算点对距离比较方便, 避免了地理球面距离的计算或者地理坐标的平面投影。

RPC 模型是一种与传感器无关的通用模型, 是对严格几何成像模型的高精度拟合, 在遥感领域得到了广泛的应用。RPC 模型是关于地面点坐标  $(\varphi, \lambda, h)$  与图像坐标  $(l, s)$  的比值多项式, 定义为<sup>[4]</sup>

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{\text{Num}_L(u, v, w)}{\text{Den}_L(u, v, w)} \\ x &= \frac{\text{Num}_S(u, v, w)}{\text{Den}_S(u, v, w)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中,  $u, v, w$  为物方的正则化坐标, 分别表示纬度、经度、高程,  $y, x$  为像方的正则化坐标, 分别表示行、列, Num 与 Den 多项式的通用形式为

$$\begin{aligned}
 p(u, v, w) = & a_1 + a_2v + a_3u + a_4w + a_5vu + a_6vw \\
 & + a_7uw + a_8v^2 + a_9u^2 + a_{10}w^2 + a_{11}uvw \\
 & + a_{12}v^3 + a_{13}vu^2 + a_{14}vw^2 + a_{15}v^2u \\
 & + a_{16}u^3 + a_{17}uw^2 + a_{18}v^2w \\
 & + a_{19}u^2w + a_{20}w^3
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中,  $a_1 \sim a_{20}$  为多项式系数, RPC 模型中的 4 个多项式共有 80 个系数。正则化计算可表示为

$$\left. \begin{aligned}
 u &= (\varphi - \varphi_0)/\varphi_s, v = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_s, w = (h - h_0)/h_s \\
 y &= (l - l_0)/l_s, x = (s - s_0)/s_s
 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中,  $\varphi_0, \lambda_0, h_0, l_0, s_0$  与  $\varphi_s, \lambda_s, h_s, l_s, s_s$  分别为正则化的平移与尺度参数。

通过 RPC 模型的逆变换, 可以将 AIS 数据中的地理坐标转化为图像行列号坐标。由于舰船目标在海面上, 计算像方坐标时高程可以近似设为 0。

### 2.2 点迹关联

点迹关联主要是求解某一时刻的目标点迹的对应关系, 有效判断哪些目标点迹信息来自同一个目标。静轨光学卫星与 AIS 的目标点迹关联可以综合提高对舰船目标的感知能力, 同时点迹关联也是静轨光学卫星系统定位误差校正的前提。AIS 定位精度较为准确, 不考虑 AIS 的定位误差及插值误差, 以 AIS 的位置作为真实的目标位置, 将其看作动态的 GCP 来处理。静轨光学卫星图像目前的分辨率还不高, 舰船目标只占几个到几十个像素点, 难以提取有效可靠的特征信息, 通过检测处理只能得到舰船在图像的位置信息。同时, 受海浪杂波等因素影响, 检测结果中往往含有大量的虚假目标。图 2 为 GF-4 卫星图像中两个舰船目标切片以及相应的属性信息, 可以看出, 在 50 m 图像分辨率下, 即使长度为 300 m 左右的大型舰船目标也很弱小。另一方面, 虽然利用单帧卫星图像多个光谱通道的成像时间差, 可以得到目标粗略的速度、方向等运动信息<sup>[3]</sup>, 但是每个光谱通道目标检测能力不同, 一些通道目标可能检测不出来, 影响运动信息的估计。因此, 本文只利用位置信息进行关联, 根据数据与算法特

点, 结合 ICP 与 GNN, 将点迹关联转化为点模式匹配问题处理。

ICP 是点模式匹配中的经典算法<sup>[13]</sup>, 它是基于最小二乘进行最优匹配, 其基本思想是通过迭代的方式进行“刚体变换—最优估计”的过程, 使得模型点集逐步逼近待匹配点集。一次迭代由旋转与平移构成, 计算每一次迭代的最优刚体变换, 确定对应关系点集, 通过多次迭代可使两个点集的误差平方和最小。由于静轨光学卫星点迹集合中虚假目标较多, 为了提高 ICP 在噪声点存在时的鲁棒性, 本文采用迭代加权最小二乘(Iteratively Reweighted Least Squares, IRLS)ICP<sup>[14]</sup>进行数据粗关联。设待关联的 AIS 与静轨光学卫星点迹集合分别为  $\mathbf{X}$  与  $\mathbf{Y}$ ,

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_j\}_{j=1}^{N_A}, \quad \mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_i\}_{i=1}^{N_S} \tag{4}$$

其中,  $N_S$  与  $N_A$  分别为卫星和 AIS 集合中数据点的个数。IRLS-ICP 的具体步骤如下:

(1) 在点集  $\mathbf{X}_A$  中选择初始点集  $\mathbf{X}^{(1)} = \{\mathbf{x}_j^{(1)}\}_{j=1}^{N'_A}$ ,

其中  $\mathbf{x}_j^{(1)}$  满足  $\min_i \|\mathbf{y}_i - \mathbf{x}_j^{(1)}\| \leq \varepsilon_1$ , 即至少与一个卫星点迹的距离小于阈值  $\varepsilon_1$  的 AIS 数据才参与关联过程,  $N'_A$  为初始点集个数,  $\|\cdot\|$  为 2 范数;

(2) 由  $\mathbf{X}^{(k-1)}$  中的点  $\mathbf{x}_i^{(k-1)}$  在  $\mathbf{Y}$  搜索出其最近点  $\mathbf{y}_i^{(k-1)}$  组成一个点对, 找出两个点集中所有的点对, 组成点对集合;

(3) 根据点对集合, 计算出加权最小二乘下的旋转矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  和平移向量  $\hat{\mathbf{T}}$ , 即

$$[\hat{\mathbf{R}}, \hat{\mathbf{T}}] = \arg \min_{\mathbf{R}, \mathbf{T}} \sum_{i=1}^N w_i \|\mathbf{y}_i^{(k-1)} - \mathbf{R}\mathbf{x}_i^{(k-1)} - \mathbf{T}\|^2 \tag{5}$$

其中,  $w_i = w(\|\mathbf{y}_i^{(k-1)} - \mathbf{x}_i^{(k-1)}\|)$ ,  $w(\cdot)$  为加权函数<sup>[14]</sup>;

(4) 由  $\hat{\mathbf{R}}, \hat{\mathbf{T}}$  计算  $\mathbf{x}_i^{(k)} = \hat{\mathbf{R}}\mathbf{x}_i^{(k-1)} + \hat{\mathbf{T}}$ , 得到点集

$\mathbf{X}^{(k-1)}$  经过刚体变换之后的新点集  $\mathbf{X}^{(k)}$ ;

(5) 重复步骤(2)~步骤(4)的迭代过程, 直到满足收敛条件或达到预设的迭代次数。收敛条件为

$$\left. \begin{aligned}
 |r^{(k)} - r^{(k-1)}| &< \varepsilon \\
 r^{(k)} &= \sum_{i=1}^N w_i \|\mathbf{y}_i^{(k)} - \mathbf{R}\mathbf{x}_i^{(k)} - \mathbf{T}\|^2
 \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

即连续两次加权距离平方和之差绝对值小于阈值  $\varepsilon$ , 就停止迭代。

ICP 旋转矩阵的计算可以采用奇异值分解、四元数等方法。在整个卫星图像区域像方误差采用仿射模型, 但在图像的小范围区域内, 误差关系可以近似为刚体变换(旋转和平移)。其中, 角度误差较小, 而平移误差较大, 为了简化计算可以将旋转矩

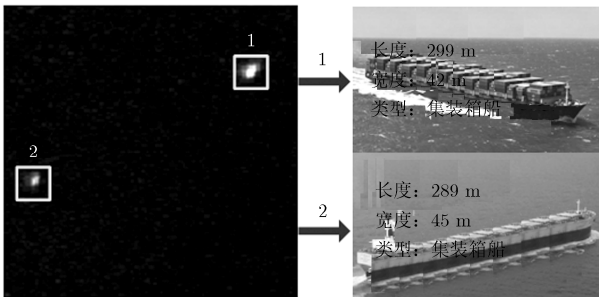


图 2 卫星舰船目标切片及相应信息

阵近似为单位矩阵，只需要求解平移向量。

在 ICP 算法中，寻找匹配点对时选取最近点，不能保证点对的一一对应关系，同时一些干扰点也会找到最近点。为了得到更加准确的关联点对，本文在 ICP 迭代结束后，再进行 GNN 精关联。GNN 算法是在 NN 的基础上提出的，从关联的整体性考虑，寻找全局代价最小的最优关联。其中，关联变量  $T_{ij}$  的取值应该使点对距离  $d_{ij}$  的加权和最小：

$$\min \sum_{j=1}^{N'_S} \sum_{i=1}^{N_A} d_{ij} T_{ij}, \quad d_{ij} = \|\mathbf{y}_i - \mathbf{x}_j^{(k)}\| \quad (7)$$

需要满足如式(8)约束条件：

$$\left. \begin{aligned} d_{ij} \leq \varepsilon_2, \quad i \leftrightarrow j \\ \sum_{i=1}^{N_A} T_{ij} \leq 1, \quad \sum_{j=1}^{N'_S} T_{ij} \leq 1, \quad T_{ij} \in \{0,1\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中， $\varepsilon_2$  为最大关联距离，点对距离超过  $\varepsilon_2$  不进行关联， $T_{ij} = 1$  代表点对关联， $T_{ij} = 0$  代表不关联。GNN 中对应关系可以采用 Munkres 或者 Jonker-Volgenant-Castanon 分配算法求解<sup>[7]</sup>，本文采用前者。

### 2.3 误差校正

误差校正主要是求解误差参数，对系统误差进行有效补偿后得到更加精确的坐标。基于 RPC 模型的几何定位，其内部精度较高，但整体定位精度可能存在一定的系统误差。对于低轨卫星而言，无控下的定位精度可以达到 100 m 甚至 10 m 之内，在精度要求不高时不需要系统误差的校正。而静轨光学卫星距离地球较远，通过 RPC 模型变换的无控定位精度远低于低轨卫星，存在较大 RPC 模型系统误差。在缺少 GCP 的情况下，本文利用关联的 AIS 数据进行 RPC 校正。为了修正系统误差，采用像方仿射变换补偿模型：

$$\left. \begin{aligned} l' &= e_0 + e_1 l + e_2 s \\ s' &= f_0 + f_1 l + f_2 s \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中， $(l', s')$  为 AIS 采用 RPC 模型计算得到像方坐标， $(l, s)$  为 AIS 关联的卫星图像检测点迹的像方坐标， $(e_i, f_i)$  为两组坐标之间的变换参数。当  $e_1 = f_1 = 1$  且  $e_2 = f_2 = 0$  时，式(9)则转化为平移补偿。

误差模型中的校正参数为仿射变换矩阵，有 6 个自由度，只需要 3 个关联点对解算，更多的点对可以采用最小二乘(Least Squares, LS)进行解算。但是，在实际 AIS 接收系统中，接收得到的每个舰船目标的 AIS 数据更新率不同，因此各个点对的 AIS 插值误差不同，匹配的点对中匹配的定位精度不同，可以看作存在一定数量的误配点。如果不加区分地对待所有输入数据，直接求解仿射变换参数，往往

有较大的参数估计误差，为此需要在匹配点集中自动选取出适合估计仿射变换的子集。为了稳健估计系统误差中变换参数，本文采用 RANSAC 算法<sup>[15]</sup>进一步剔除低精度匹配点，再通过 LS 由多个匹配点对解算出像方补偿参数，其步骤如下：

- (1)每次随机选取 3 对匹配点，计算出仿射变换参数，再求得其他点对在当前变换下的误差，误差小于某一阈值的点对作为内点，保存内点集合；
- (2)重复  $N$  次随机采样，得到最大内点集合；
- (3)对最大内点集合采用 LS 算法求解出仿射变换参数。

求解出仿射变换参数后，通过 RPC 模型的偏置补偿与正变换(一定次数的迭代求解)，将舰船目标的检测结果转化为物方坐标，实现了单帧影像的舰船目标坐标的误差校正。

### 3 实验验证

为了验证静轨光学卫星与 AIS 目标点迹关联与误差校正算法的有效性，本文选取了 5 幅 GF4 卫星的全色多光谱数据，成像区域位于我国东海，成像时间为 2017 年 3 月 9 日 11:47:24~11:59:47，帧间间隔为 186 s，图像分辨率为 50 m，为 level1A 数据(未正射校正)。同时，根据卫星成像时间与区域选取 2017 年 3 月 9 日 11:40~12:10 30 min 内的 AIS 数据进行关联与校正实验，AIS 数据主要来源于岸基平台，数据更新率最高为 1 min，最低为 30 min。本文选取两个典型的 2048×2048 像素区域(约 100 km×100 km)进行关联算法验证，为了得到舰船目标检测结果，本文采用恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)算法<sup>[16]</sup>进行近红外波段的目标检测。在 CFAR 检测时，为了降低虚警率和便于后续实验评估，只保留像素点大于 1 的目标，因此为了保证 AIS 数据可以关联上检测点迹，需要过滤掉长度 50 m 以下目标的数据。

图 3 为两个区域的像方坐标，其中，在区域 1 中舰船目标比较密集，虚假目标较少，而在区域 2 中虚假目标较多，“GF-4”代表 5 帧卫星图像检测结果，“AIS”为经过筛选、插值(AIS 插值的时间间隔需要增加约 40 s 的波段成像延时<sup>[3]</sup>)以及 RPC 逆变换后的像方坐标。可以看出，AIS 与 GF-4 数据之间存在一定程度的偏移，增加了数据关联的难度。

分别采用 NN, GNN 和本文算法对两个区域的点集进行点迹关联对比，其中，考虑到卫星最大 6 km 的定位偏移量，3 种算法的最大关联门限均设为 140 个像素距离，即  $\varepsilon_1 = 140$ ，在本文算法的 GNN 精匹配中，设  $\varepsilon_2 = 20$ 。3 种算法第 1 帧检测结果与

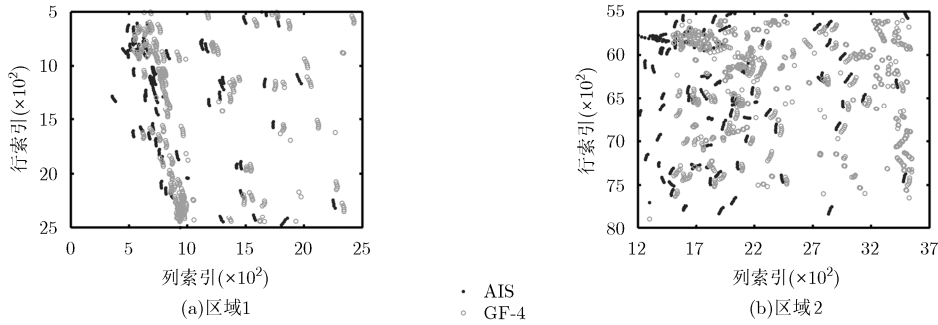


图 3 5 帧检测结果与 AIS 数据在像方的点迹分布

AIS 数据的关联效果分别如图 4 所示, 其中连接线表示关联点对, 圆圈标注了部分典型的关联错误, 图 4(a)~图 4(c)为区域 1, 图 4(d)~图 4(f)为区域 2。可以看出, 本文算法的关联效果最好, NN 算法最差。如图 4(a), 图 4(d)中的圆圈所示, 在 NN 中, 多个 AIS 点连接 1 个 GF-4 点, 出现了严重的关联错误。通过图 4(b), 图 4(e)中的圆圈与图 4(c), 图 4(f)中相应位置的对比, 可以看出在 GNN 中, 虽然避免了多对一的关联, 但是没有考虑系统误差, 不能反映误差的走向, 导致 AIS 点与邻近的 GF-4 点错误关联。在本文算法中, 关联具有一定的方向性, 正确反映了系统误差的走向。一些 AIS 点没有关联到 GF-4 点, 代表该目标在 GF-4 中没有被有效检测出来。同时, 一些 GF-4 点没有关联上 AIS 点, 可能该点为虚假目标, 也可能为非合作目标, 可由 GF-4 的跟踪处理进一步确认。其中, 非合作目标是

舰船目标监视的重点目标, GF-4 与 AIS 的关联也为非合作目标的发现提供了一种重要手段。

表 1 为 5 帧数据下不同关联算法的性能比较, 其中, 关联正确率定义为算法正确关联的点对数与关联总点对数的比值, 正确关联点对数由 AIS 验证结合人工判图得到。可以看出, 本文算法的关联正确率最高, 平均 5 帧关联正确率为 97.5%, 其次是 GNN, 最后是 NN。ICP 可以看成迭代的 NN 算法, 是一个边估计误差边关联的过程, 经过 ICP 变换后的点集  $\mathbf{X}^{(k)}$  已经比较接近点集  $\mathbf{Y}$ , 在 ICP 之后的 GNN 更是保证了关联的全局最优与唯一性, 因此本文算法抗噪声能力优于 NN 和 GNN 算法。同时, 本文采用了 IRLS-ICP, 加权的 ICP 更具有鲁棒性。在计算机处理器 Intel Core i5 CPU@2.5 GHz、内存 2 G、软件 Matlab2010a 的情况下, 本文关联算法 5 帧的平均关联时间约为 0.04 s, 高于 NN, 但

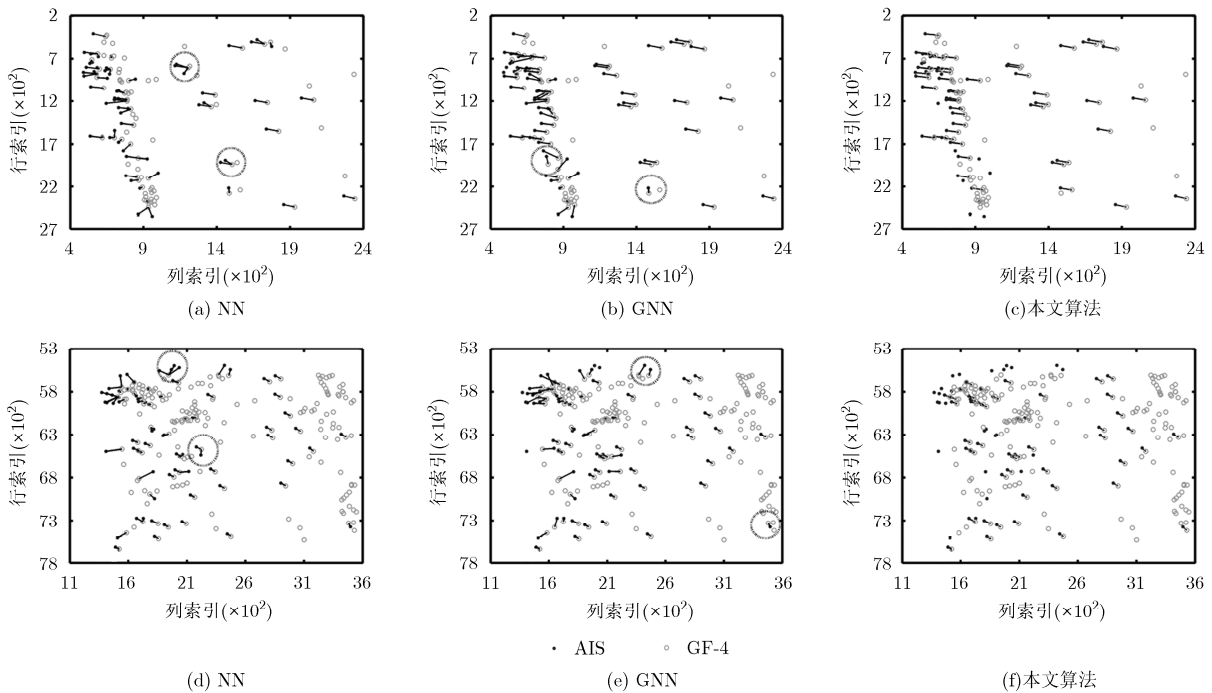


图 4 不同算法的关联效果

表1 关联算法的性能比较

帧号	关联正确率(%)			关联时间(s)		
	NN	GNN	本文算法	NN	GNN	本文算法
1	35.3	56.7	96.8	0.002	0.265	0.076
2	33.3	54.2	98.0	0.003	0.242	0.031
3	32.8	46.6	96.8	0.003	0.247	0.033
4	28.3	51.7	98.0	0.002	0.175	0.018
5	31.3	61.5	98.0	0.003	0.248	0.022
平均	32.2	54.9	97.5	0.003	0.235	0.036

小于 GNN。在 GNN 关联中，由于初始门限  $\epsilon_1$  较大，需要在很多点之间解算最优的对应关系。而在本文算法中，最后采用 GNN 进行精关联，关联门限  $\epsilon_2$  较小，每个 AIS 点可能关联的检测点数减少，降低了对应关系解算的复杂度，使得关联时间小于直接进行 GNN 关联。

利用 RANSAC 算法(随机采样次数  $N$  设为 1000，距离阈值设为 10)进一步去除奇异点，以第 1 帧为例，两区域共去除了 3 个误差较大的点对，得到 92 个关联点对，其中区域 1、区域 2 中每帧的点对数目均为 46。图 5 为第 1 帧点对校正前后的定位误差，其中，“校正 1”为 92 个点对参与的像方平移补偿，“校正 2”为区域 1 中点对参与的像方仿射补偿，“校正 3”为 92 个点对参与的像方仿射补偿，

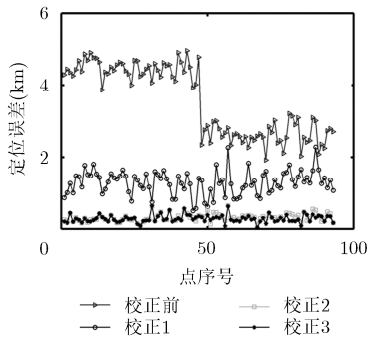


图 5 第1帧校正前后的定位误差

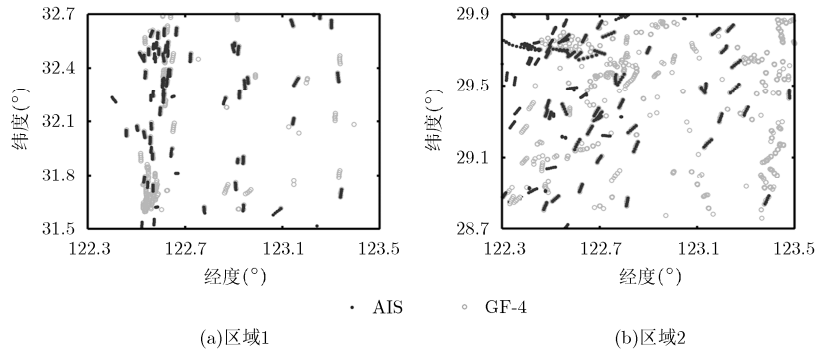


图 6 误差校正后的物方坐标

92 个点对均作为检查点。通过高斯-克吕格投影，将目标的经纬度坐标转化为平面坐标，再计算相应点对间的距离，以平面误差衡量定位误差。可以看出，“校正 3”的定位精度优于“校正 2”、“校正 1”，远优于校正前的定位精度。图 6 为利用“校正 3”中的补偿模型得到的两区域 5 帧的物方坐标，可以看出，校正后静轨光学卫星与 AIS 目标点迹近似重合。不考虑舰船检测的时间(两个区域平均每帧的检测时间约为 100 s)，本文算法从点迹关联到得到两区域校正的物方坐标，每帧的平均运算时间约为 1 s，基本能够满足关联与误差校正的实时性。

详细的 5 帧点对的定位误差如表 2 所示。由表 2 可得，校正前 GF-4 卫星舰船目标 5 帧的平均定位误差为 3823.1 m，最大可达 5387.1 m。利用 AIS 数据对 GF-4 卫星图像检测结果进行校正，“校正 3”中平均定位误差减小为 72.8 m，定位精度优于 2 个像素。一般情况下，目标的船距大于 500 m，因此本文算法的定位误差基本可以满足海洋监视的需要。对比“校正 1”与“校正 3”可知，同样的点对下，仿射补偿比平移补偿有更高的补偿精度，更符合实际的误差模型。对比“校正 2”与“校正 3”可知，更多区域的点对参与补偿，定位精度更高。为了提高校正精度，参与 RPC 模型校正的点对需要尽可能均匀分布在整个区域，这与利用 GCP 参与补偿时的位置分布要求是一致的。

表2 校正前后的定位误差

帧号	校正前(m)			校正 1(m)			校正 2(m)			校正 3(m)		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均
1	1996.7	4883.7	3528.8	531.4	2057.5	1268.3	11.5	487.6	132.5	5.5	467.3	71.3
2	2425.4	5338.2	4000.7	613.0	2104.0	1271.2	4.2	274.9	84.8	7.4	282.8	70.6
3	2425.7	5387.1	4038.1	658.4	2115.6	1283.9	7.2	601.0	248.6	14.4	258.5	75.9
4	2364.1	5291.6	3966.3	696.1	2108.1	1280.3	12.9	288.1	106.8	1.8	239.8	71.9
5	2002.0	4923.2	3581.8	603.7	2182.6	1267.4	7.3	254.9	96.7	3.4	275.7	74.1

## 4 结束语

结合静轨光学卫星舰船目标监视的实际需求, 本文提出了一种基于 AIS 的静轨光学卫星目标点迹关联与误差校正方法。为了提高运算速度和匹配精度, 采用 ICP 与 GNN 相结合的方法实现目标点迹的最优关联, 采用 RPC 模型进行误差补偿实现坐标的校正。本文算法复杂度低, 利于工程实现, 通过实测数据验证了算法的有效性, 主要表现为: (1) 静轨光学卫星与 AIS 目标点迹关联正确率高, 实现了两种信息的有效融合, 提高了舰船目标的监视能力; (2) 关联的点对可以用于 RPC 模型的误差补偿, 极大提高了舰船目标的定位精度。本文算法为静轨光学卫星与 AIS 目标点迹关联与误差校正提供了一种可行方法, 其中的关联算法也可以应用到其他类型信息的关联, 下一步考虑研究更多传感器数据、更高层次的融合, 进一步提高海上态势感知能力。

## 参考文献

- [1] LIU Y, ZHOU Z, YAO L, *et al.* Track filtering for space-based maritime surveillance in geographic coordinates[C]. International Conference on Information Fusion, Xi'an, China, 2017: 1-6. doi: 10.23919/ICIF.2017.8009773.
  - [2] 李晓博, 孙文方, 李立. 静止轨道遥感卫星海面运动舰船快速检测方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1862-1867. doi: 10.11999/JEIT141615.  
LI Xiaobo, SUN Wenfang, and LI Li. Ocean moving ship detection method for remote sensing satellite in geostationary orbit[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1862-1867. doi: 10.11999/JEIT141615.
  - [3] ZHANG Z, SHAO Y, TIAN W, *et al.* Application potential of gf-4 images for dynamic ship monitoring[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(6): 911-915. doi: 10.1109/LGRS.2017.2687700.
  - [4] FRASER C S and HANLEY H B. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(8): 909-915. doi: 10.14358/PERS.71.8.909.
  - [5] PEHANI P, OTAR K, MARSETI A, *et al.* Automatic geometric processing for very high resolution optical satellite data based on vector roads and orthophotos[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 343. doi: 10.3390/rs8040343.
  - [6] 齐林, 崔亚奇, 熊伟, 等. 基于距离检测的自动识别系统和对海雷达航迹抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1855-1861. doi: 10.11999/JEIT141472.  
QI Lin, CUI Yaqi, XIONG Wei, *et al.* Anti-bias association algorithm for automatic identification system and radar based on bias detection[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1855-1861. doi: 10.11999/JEIT141472.
  - [7] 张晖, 刘永信, 张杰, 等. 地波雷达与自动识别系统目标点迹最优关联算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 619-624. doi: 10.11999/JEIT140678.  
ZHANG Hui, LIU Yongxin, ZHANG Jie, *et al.* Target point tracks optimal association algorithm with surface wave radar and automatic identification system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 619-624. doi: 10.11999/JEIT140678.
  - [8] JI Y, ZHANG J, MENG J, *et al.* Point association analysis of vessel target detection with SAR, HFSWR and AIS[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(9): 73-81. doi: 10.1007/s13131.
  - [9] KAZIMIERSKI W. Proposal of neural approach to maritime radar and automatic identification system tracks association [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 11(5): 729-735. doi: 10.1049/iet-rsn.2016.0409.
  - [10] CHATURVEDI S K, YANG C S, OUCHI K, *et al.* Ship recognition by integration of SAR and AIS[J]. *The Journal of Navigation*, 2012, 65(2): 323-337. doi: 10.1017/S0373463311000749.
  - [11] ZHAO Z, JI K, XING X, *et al.* Ship surveillance by integration of space-borne SAR and AIS—further research[J]. *The Journal of Navigation*, 2014, 67(2): 295-309. doi: 10.1017/S0373463313000702.
  - [12] ZHANG H, LIU Y, JI Y, *et al.* Multi-feature maximum likelihood association with space-borne SAR, HFSWR and AIS[J]. *The Journal of Navigation*, 2017, 70(2): 359-378. doi: 10.1017/S037346331600062X.
  - [13] BESL P J and MCKAY H D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2002, 14(2): 239-256. doi: 10.1109/34.121791.
  - [14] BERGSTRÖM P and EDLUND O. Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares[J]. *Computational Optimization & Applications*, 2014, 58(3): 543-561. doi: 10.1007/s10589-014-9643-2.
  - [15] FISCHLER M A and BOLLES R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395. doi: 10.1145/358669.358692.
  - [16] EL-DARYMLI K, MCGUIRE P, POWER D, *et al.* Target detection in synthetic aperture radar imagery: A state-of-the-art survey[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 071598. doi: 10.1117/1.JRS.7.071598.
- 刘勇: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为多传感器信息融合、目标跟踪等。  
姚力波: 男, 1980年生, 博士生, 讲师, 研究方向为多传感器信息融合、遥感图像处理等。  
周智敏: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为新体制雷达系统与技术等。