



星基数据采集系统多普勒定位反演模型研究

李申阳, 蔡霞, 孙从容, 王海涛, 崔鹤

引用本文:

李申阳,蔡霞,孙从容,王海涛,崔鹤. 星基数据采集系统多普勒定位反演模型研究[J]. 智能系统学报, 2022, 17(3): 576–584.

LI Shenyang, CAI Xia, SUN Congrong, WANG Haitao, CUI He. Doppler positioning inversion model of a satellite-based data collection system[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2022, 17(3): 576–584.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202104007>

您可能感兴趣的其他文章

基于时空约束密度聚类的停留点识别方法

Stay point recognition method based on spatio-temporal constraint density clustering

智能系统学报. 2020, 15(1): 59–66 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201910026>

多配送中心下生鲜农产品同步取送选址-路径优化

Fresh agricultural cargoes location-routing optimization with simultaneous pickup and delivery for multiple distribution centers

智能系统学报. 2020, 15(1): 50–58 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201905042>

一种基于Multi-Egocentric视频运动轨迹重建的多目标跟踪算法

A multi-object tracking algorithm based on trajectory reconstruction on multi-egocentric video

智能系统学报. 2019, 14(2): 246–253 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201709003>

图正则化稀疏判别非负矩阵分解

Graph-regularized, sparse discriminant, non-negative matrix factorization

智能系统学报. 2019, 14(6): 1217–1224 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811021>

结合稀疏表示与约束传递的半监督谱聚类算法

A semi-supervised spectral clustering algorithm combined with sparse representation and constraint propagation

智能系统学报. 2018, 13(5): 855–862 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201703013>

基于嘴巴状态约束的人脸特征点定位算法

A facial feature point locating algorithm based on mouth-state constraints

智能系统学报. 2016, 11(5): 578–585 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201602006>



微信公众平台



期刊网址

DOI: 10.11992/tis.202104007

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20211210.2102.002.html>

星基数据采集系统多普勒定位反演模型研究

李申阳¹, 蔡霞^{1,2}, 孙从容³, 王海涛⁴, 崔鹤^{1,2}

(1. 航天恒星科技有限公司, 北京 100095; 2. 天津航天中为数据系统科技有限公司, 天津 300301; 3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100086; 4. 东方红卫星移动通信有限公司, 重庆 401120)

摘要: 针对星基 Argo 数据收集系统 (data collection system, DCS) 浮漂多普勒位置反演的应用需求, 通过对地球表面约束、数字高程约束两种模型在实际应用中的收敛性能分析, 给出面向海洋特色应用的缺省高度约束的位置反演算法, 并建立了算法精度分析评估模型。基于此模型实现了对观测样本特征、星上时标精度等浮标采集位置反演影响因子的有效分析, 从而为星基 Argo 数据采集系统下行数据位置反演算法优化、星上载荷设计优化及大星基信息采集系统建设提供理论参考。

关键词: 数据采集; 多普勒位置反演; 地球表面约束; 高程约束; 高度约束; 算法优化; 星上载荷; 星基信息采集
中图分类号: TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2022)03-0576-09

中文引用格式: 李申阳, 蔡霞, 孙从容, 等. 星基数据采集系统多普勒定位反演模型研究 [J]. 智能系统学报, 2022, 17(3): 576-584.

英文引用格式: LI Shenyang, CAI Xia, SUN Congrong, et al. Doppler positioning inversion model of a satellite-based data collection system[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2022, 17(3): 576-584.

Doppler positioning inversion model of a satellite-based data collection system

LI Shenyang¹, CAI Xia^{1,2}, SUN Congrong³, WANG Haitao⁴, CUI He^{1,2}

(1. Space Star Technology Co., Ltd, Beijing 100095, China; 2. Tianjin Zhongwei Aerospace Data System Technology Co., Ltd., Tianjin 300301, China; 3. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100086, China; 4. Macro Net Communication Co., Ltd, Chongqing 401120, China)

Abstract: To meet the practical application requirements of the floating Doppler position inversion of a space-based Argo data collection system (DCS) using the convergence performance analysis of two models of earth surface and digital elevation constraints, this study proposes a position inversion algorithm with a default height constraint for marine characteristic applications. Moreover, an algorithm accuracy analysis and an evaluation model are established. Based on this model, the influencing factors of the data retrieval of buoys—including the observation sample characteristics and accuracy of the time scale on the satellite—are effectively analyzed. The results provide a theoretical reference for the algorithm optimization of the downlink data position inversion, design optimization of onboard loads, and construction of a large satellite-based information acquisition system.

Keywords: data collection; Doppler position inversion; earth surface constraint; elevation constraint; height constraint; algorithm optimization; on-board load; satellite based information acquisition

星基数据收集系统 (data collection system, DCS), 是一种装备于卫星端的有效载荷, 其主要功能为借助卫星广域探测能力接收从地面可视范围内平台发射器终端 (platform transmitter terminal, PTT) 播发微波信号并提取出相关传感器实时测量数据的星地一体化应用系统。该系统以其全

天时、全球覆盖能力, 被广泛应用于海洋运输^[1]、海洋观测^[2-4]及地球生态^[5-6]等领域。该系统的典型应用为法国国家空间研究中心、美国国家海洋大气局和美国国家航天局合作建设的卫星数据搜集和定位系统, 简称 Argos 系统^[7]。全球海洋 1500 台漂流浮标、800 多个次表层浮标、80 多台深海锚系浮标和 300 多台沿岸锚系浮标装载了 Argos 发射机, 通过 Argos 系统搜集并传输数据, 形成了大量数据分析成果^[8-10]。

收稿日期: 2021-04-05. 网络出版日期: 2021-12-14.

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目 (2018YFC1407200); 国家自然科学基金青年基金项目 (41801291, 61806018).

通信作者: 蔡霞. E-mail: caixia64@163.com.

我国海洋动力学(海洋二号)卫星^[11]也装备了针对 Argos 体制的 PTT 信号收集载荷,对全球海洋浮标位置进行长期监视以达到追踪洋流长期状态的应用效果。但作为一种信息透传系统,除 PTT 自身编号信息固定外,其余内部信息格式不同国家、单位均不透明。因此,无论 PTT 自身是否装配了 GPS 定位模块,对于非自主投放的 PTT 而言,均无法通过数据解析的方式获得其位置信息。只能将通过载荷对测量载波本身的多普勒频率偏移值作为测距信息,伴随卫星时标及卫星自身定位结果回传地面站,再经过定位反演算法解算浮标位置方可实现对 PTT 位置信息的有效获取^[12-15]。

国内外学者针对基于多普勒测量的位置反演方法进行了建模研究。FENG 等^[16]对单星多普勒位置反演误差模型进行了推导,论证了卫星与浮标之间的相对位置关系、信号测量频度、空间噪声环境等因素对 PTT 位置反演精度带来的影响。AHMED 等^[17-18]从测量信号到达时间差(time difference of arrival, TDOA)的研究角度,对测量时间误差对源端定位的影响进行了建模分析。本文结合海洋动力学卫星在轨实测数据,针对传统的最小二乘反演模型以增加约束的角度改善算法收敛效能,在 PTT 位置追踪应用的背景下,以牺牲高度反演信息的方式给出了一种快速反演约束算法,改善了传统反演算法在单星测量数据条件下收敛精度低甚至不收敛的问题。

1 PTT 位置反演算法原理

PTT 位置反演原理采用基于多普勒频移的单点定位方法,借助 PTT 信号导频段单载波信号,星上数据收集载荷进行锁相跟踪并以固定时间间隔输出多普勒测量值,借助卫星过境弧段多次测量形成几何分布并实现位置反演,如图 1 所示。

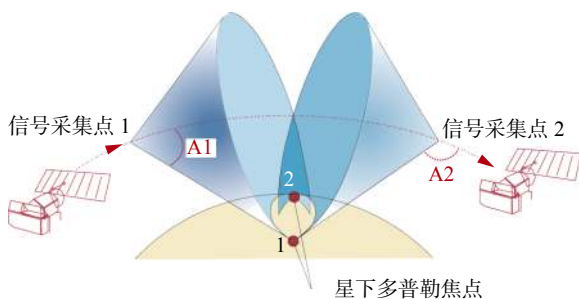


图 1 PTT 位置反演原理示意图

Fig. 1 PTT position inversion principle diagram

宋叶志等^[19]利用牛顿迭代算法原理给出一种基于最小二乘法的 PTT 定位算法,可实现对 PTT 位置及频率的解算。

$$F_j = f \left[1 - \frac{(v_s^j - v_b) \cdot (r_s^j - r_b)}{|r_s^j - r_b|} \right] + \varepsilon \quad (1)$$

式中: F_j 为卫星 j 时刻测量到的频率; f 为发射频率; v_s^j 为卫星 j 时刻速度; v_b 为 PTT 的速度; r_s^j 为卫星 j 时刻位置; r_b 为 PTT 的位置, 坐标系为惯性系; ε 为测量噪声。

定义 $\dot{\rho}$ 为每次测量的距离变化率, 且令

$$\dot{\rho} = \frac{(v_s^j - v_b) \cdot (r_s^j - r_b)}{|r_s^j - r_b|} + \varepsilon \quad (2)$$

式中 v_b^j 为当次估计的 PTT 速度, 则式 (1) 可简化为

$$F_j = f(1 - \dot{\rho}) + \varepsilon \quad (3)$$

若进一步对式 (2) 进行简化, 令

$$\Delta = \begin{bmatrix} r_{sx} \\ r_{sy} \\ r_{sz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{bx} \\ r_{by} \\ r_{bz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: r_{sx} 、 r_{sy} 、 r_{sz} 分别为卫星在收到信号时刻的位置(轨道参数), 为已知量; 而 r_{bx} 、 r_{by} 、 r_{bz} 为当前时刻 PTT 的位置量, 为待估量。

因此, 将卫星过境时每次测量到的 F_j 和卫星测量时刻位置 r_{sx} 、 r_{sy} 、 r_{sz} 作为已知量, 并代入式 (3) 形成超定方程, 即可通过设置合理的收敛结束判据(如连续 5 次迭代误差小于某门限值), 利用最小二乘法进行参数估计对 r_{bx} 、 r_{by} 、 r_{bz} 进行解算。其最小二乘解可以定义为

$$\Delta Y = (H^T H)^{-1} (H^T y) \quad (5)$$

式中: ΔY 为包含 r_{bx} 、 r_{by} 、 r_{bz} 和发射频率 f 的待估计参数修正量; H 为包含 r_{sx} 、 r_{sy} 、 r_{sz} 、 F_j 的观测矩阵, 其维度视观测次数而定; y 为测量残差。

2 算法改进及约束设置

由于单颗海洋卫星过顶次数有限, 单次过顶测量数据量极少(仅 3~5 次), 且所形成的超定方程组线性度较高, 模型式 (5) 往往很难有效收敛。在不进行约束改进的情况下, 传统的 PTT 位置反演模型几乎无法实现有效收敛。

因此, 为提高算法收敛能力, 必须引入部分约束条件使三维观测减小。在文献 [19] 中, 给出了以下 2 种约束模型, 并对改进模型进行了理论推导, 具体约束设置为:

1) 结合数字高程, 将高度参数 r_{bz} 用数字高程图进行拟合约束计算;

2) 结合地球表面方程, 将高度参数 r_{bz} 用椭球方程进行约束计算。

值得一提的是, 上述约束均基于位置反演结果中的高度参数 r_{bz} 进行替换计算。

2.1 基于数字高程约束的 PTT 位置反演算法

引入数字高程约束^[20], 将 r_b 表示成大地坐标 λ 、 φ 、 h 形式, 其中大地高度可以用数字高程给出:

$$\begin{cases} x_b = (N+h)\cos\lambda\cos(\varphi+g) \\ y_b = (N+h)\cos\lambda\sin(\varphi+g) \\ z_b = [N(1-e^2)+h]\cos(\varphi+g) \end{cases} \quad (6)$$

式中: g 为恒星时; e 为地球扁率; N 可表示为

$$N = R_e(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中 R_e 为地球半径。

通过该约束, 在对式 (5) 进行迭代运算的过程中, 将 $\Delta \mathbf{Y}$ 转换为与 λ 、 φ 、 h 相关的变量, 每次迭代获得的 λ 、 φ 、 h 中将高程 h 均使用数字高程图进行 bspline 拟合得到, 进而修正直接迭代引入的误差, 实现缩减观测参数下的快速收敛。

2.2 基于地球表面约束的 PTT 位置反演算法

引入地球表面约束^[21], 将地球近似成椭球体, 通过椭球方程将高度信息用精度、纬度信息进行换算, 可有效减少一维观测量以实现快速收敛。

将地球表面近似为椭球面后, 约束方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (8)$$

式中: $a = b = 6\,378.140\text{ km}$; $c = 6\,356.755\text{ km}$ 。

这样仍可找出 r_{bz} 与 r_{bx} 和 r_{by} 的换算关系, 再使用相同的计算方式在每次迭代过程中替换 r_{bz} 以达到缩减观测参数的目的。

3 约束改进及误差评估分析

3.1 基于缺省高度约束的 PTT 位置反演算法

对于前面两种改进约束模型, 其核心宗旨是在不丢失高度估计参数的基础上, 使用数字高程或地球表面约束的方式规避迭代的累积误差。但由于数字高程拟合和地球表面约束模型本身同样存在一定程度的误差, 该误差同样会在迭代过程中逐步放大, 进而导致收敛效果变差的问题。

根据回归海洋卫星数据收集系统的应用需求, 由于 PTT 位置反演主要用于海面 PTT 的位置追踪, 进而获取洋流动态、鱼类迁徙等环境信息, 并非高精测高用途。为了不因引入约束造成算法二次误差累积, 本文将高度参数直接置零处理, 在最终迭代收敛后仅计算一次高度, 其余模型保持不变, 具体算法如下:

- 1) 给定初值条件, 高度 h 不参加参数估计;
- 2) 计算观测量残差 y 和矩阵 \mathbf{H} ;
- 3) 将估计结果中的 h 清 0 (不参与迭代);
- 4) 计算改正量 $\Delta \mathbf{Y}$ 和新的位置;
- 5) 如果新旧位置差小于一指定小量 (如 1 m), 迭代完成, 否则回到 2)。

通过选择典型 (固定浮标) 浮标与不同算法反演结果进行逐个匹配给出测量误差的定量指标,

并进行等级评估。各级误差等级如表 1 所示。

表 1 误差等级定义
Table 1 Error level definition table

误差等级	距离误差/km
I级	$d < 1$
II级	$1 < d < 5$
III级	$5 < d < 10$
IV级	$10 < d < 100$
V级	$d > 100$

定义第 i 次迭代后收敛因子 P_c^i 为其与上一次迭代结果矢量的欧氏距离, 则其表达式为

$$P_c^i = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{i,k} - x_{i-1,k})^2} \quad (9)$$

式中: m 表示待估计参数的个数, 在数字高程约束模型和地球表面约束模型, 待估计参数分别为 λ 、 ϕ 、 h 和 r_{bx} 、 r_{by} 、 r_{bz} , 则 $m = 3$; 而对于缺省高度的模型, 其待估计参数仅剩 r_{bx} 、 r_{by} , 其 $m = 2$; $x_{i,k}$ 表示在第 i 次迭代所得的第 k 个待估计参数的估计值。

定义收敛判据 T_c 的计算方式为

$$T_c = \frac{1}{t} \sum_{i=s-t}^s P_c^i \quad (10)$$

式中: s 为当前算法循环迭代的次数; t 为收敛判决窗口, 即对连续 t 次迭代效果进行评估。

3.2 算法对比分析

针对基于数字高程约束的 PTT 位置反演算法和基于地球表面约束的 PTT 位置反演算法以及本节所设计的基于缺省高度约束的 PTT 位置反演算法进行对比测试。选用海洋二号 B 卫星在轨下行数据及 Argos 公开的真实 PTT 位置信息进行对比分析。用于对比测试的 PTT 共 2 000 个, 均采用表 1 所述的等级定义作为位置反演精度评估标准, 采用式 (10) 作为算法收敛判据, 且设置判决窗口 $t = 10$, $T_c = 1 \times 10^{-5}$ 。

3.2.1 数字高程约束 PTT 位置反演算法精度分析

在仿真过程中发现, 2 000 个 PTT 的定位结果均无法收敛至 100 km 以内。

该种现象的产生主要原因在于数字高程图的引入。虽然在一定程度上避免了传统算法中将地球近似看作椭球体的误差, 但所采用的数字高程仅有 0.5 个经纬度的分辨率, 必须进行双线性插值得到数字高程, 这里引入了插值误差。此外, 由于地固坐标系到经纬高坐标系的转换过程中, 在 λ 、 ϕ 两个值的计算时同样存在误差的引入, 且在迭代过程中又不断影响 λ 、 ϕ 的计算结果。如此一来, 该误差进一步扩大化, 最终导致算法持续

不断迭代但无法收敛的现象。

3.2.2 地球表面约束 PTT 位置反演算法精度分析

算法在 2 000 个 PTT 的定位结果可以收敛, 如图 2 所示:

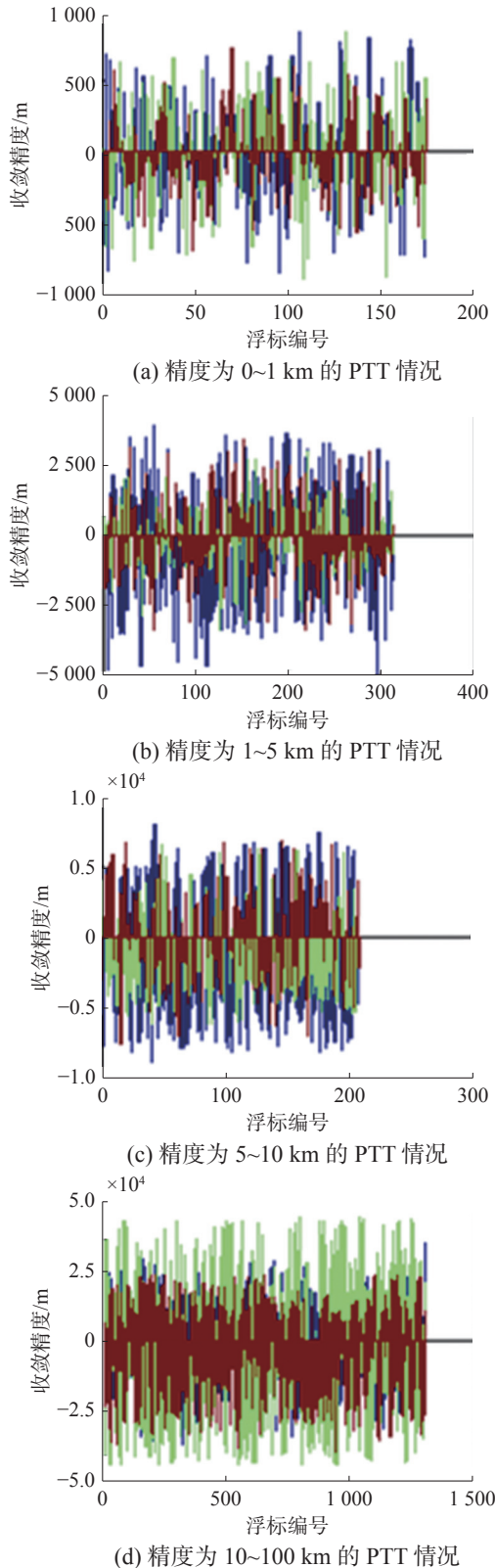


图 2 地球表面约束位置反演结果统计图

Fig. 2 Statistical chart of inversion results by using constrained position on earth surface

可见, 2000 个 PTT 的定位结果精度分布为 0~100 km。

从表 2 可以看出, 采用了地球表面约束的 PTT 位置反演收敛效果有所提升, 但精度误差较大, 究其原因主要是将地球表面近似于椭球表面产生了精度误差, 并在每次迭代过程中不断进行误差累计所致。

表 2 地球表面约束反演精度个数统计表

Table 2 Statistical table of the number of precision by using earth surface constrained inversion

精度/km	个数
0~1	174
1~5	312
5~10	209
10~100	1305

3.2.3 缺省高度约束 PTT 位置反演算法精度分析

通过对 2 000 个 PPT 的多普勒测量数据进行定位解算可实现较快收敛, 如图 3 所示:

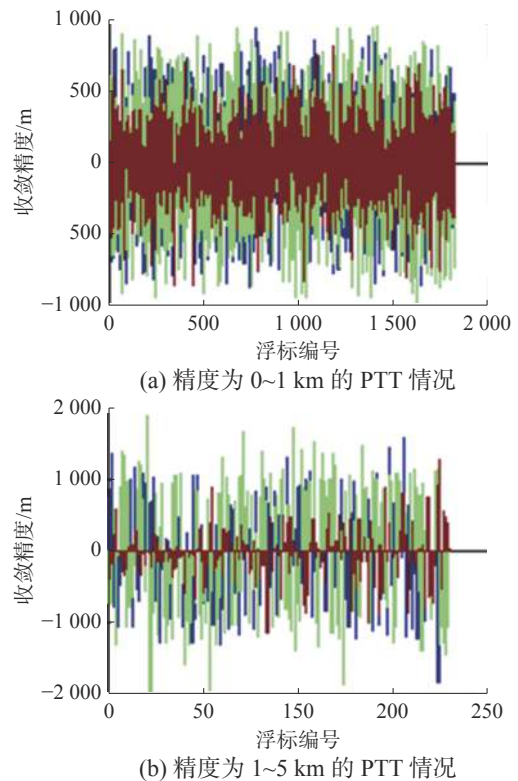


图 3 缺省高度约束位置反演算法定位结果统计图

Fig. 3 Statistical chart of positioning results by using default height constraint position inversion algorithm

可见, 2 000 个 PTT 定位结果精度在 5 km 以下。

根据表 3 中结果可得出, PTT 定位精度在 0~1 km 的个数时总 PTT 个数的 91.05%, PTT 定位精度基本在 0~1 km 范围内, 其精确度对于海洋观测而言具备可用性。

表 3 缺省高度约束定位精度个数统计表

Table 3 Statistical table for the number of positioning accuracy by using default height constraint

精度/km	个数
0~1	1 821
1~5	179

从表 3 对比结果可以看出,引入数字高程约束和地球表面约束可保证反演结果中的高度信息不丢失。但由于单颗卫星采集样本规模及线性化特征的局限,算法出现不收敛或收敛结果差的问题,且随着约束模型的简化(与地球表面约束相比,数字高程约束更简化),算法性能有提升趋势。

进一步的,对于海洋类应用将高度信息忽略不计(缺省高度约束)的方式可有效实现 km 级 PTT 位置精度反演,该方法虽然丢失了解算结果中的高度信息,但可有效实现 PTT 位置的追踪。

综上所述,面向洋流追踪等应用场景,在不考虑高度参数的情况下,采用缺省高度约束的 PTT 位置反演算法具有更好的收敛性能,能够满足海洋卫星应用需求。

4 精度影响要素分析

结合海洋卫星应用特色,影响 PTT 位置反演精度的关键因素主要包括 PTT 信号测量资料的数据规模、测量资料对应的卫星空间几何分布、卫星时标的准确度。

1) 测量资料的规模,主要取决于星上 DCS 载荷对覆盖区域内的 PTT 型号捕获的能力;

2) 资料对应的卫星空间几何分布,主要取决于卫星的轨道特性,相同时间内,共视卫星数量越多、卫星几何分布越分散,其空间几何分布越好;

3) 卫星时标延时,主要取决于星上载荷在射频信号接收时刻,所获取的时标信息存在一定延时不确定性。

4.1 不同性质观测对定位精度影响分析

对观测性质区分,包括观测的规模和观测的空间几何分布两方面,由于当前在轨卫星为单星(以海洋二号 B 卫星为例),考虑验证有效性,选择固定浮标(长时间不移动)多次过境拼接观测的方式进行算法精度验证。

从下行数据样本中找出典型多轨多次观测示例,其观测均大于 3 个轨道周期数据(模拟多星共视)且观测空间几何分布不同(模拟星座构型),进而开展精度分析如下。

1) 观测规模对解算精度的影响

针对观测的规模对定位精度的影响,将定位结果进行统计分析,见表 4 所示。

表 4 观测规模对反演精度的影响对比

Table 4 Comparison of the influence of observation scale on inversion accuracy

观测量个数	精度平均值/m
8~20	784.318 1
8~25	728.046 3
8~30	666.866 5
8~60	512.217 3
8~90	339.769 0
8~120	248.308 3

可见,随着观测量个数的增大,解算精度逐渐提升,如图 4 所示。

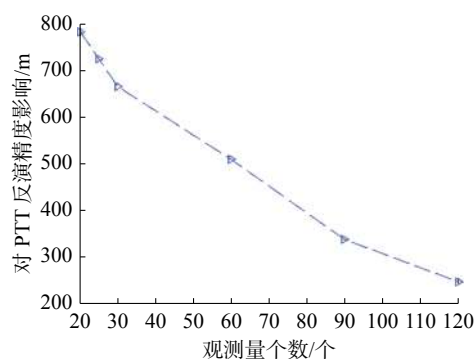


图 4 解算精度随观测量个数的变化情况

Fig. 4 Variation of solution accuracy with the number of observations

2) 观测几何分布对解算精度的影响

观测空间几何分布的不同将导致定位精度的差异性^[22-25]。通过对不同空间几何分布的空间几何值计算,并绘制出随着空间几何值增长的解算精度曲线,如图 5 所示。

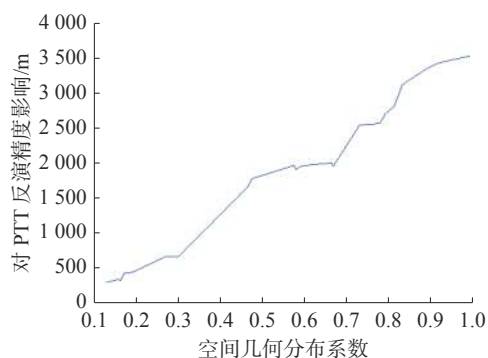


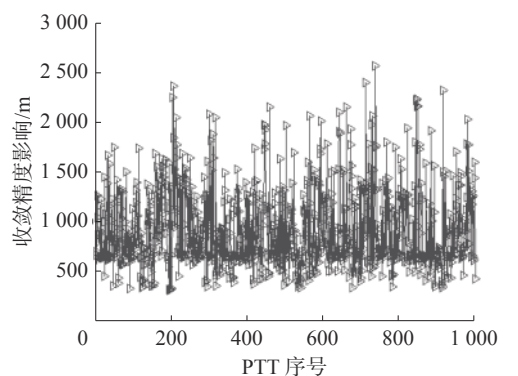
图 5 卫星空间几何分布系数与解算精度关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between satellite spatial geometric distribution coefficient and calculation accuracy

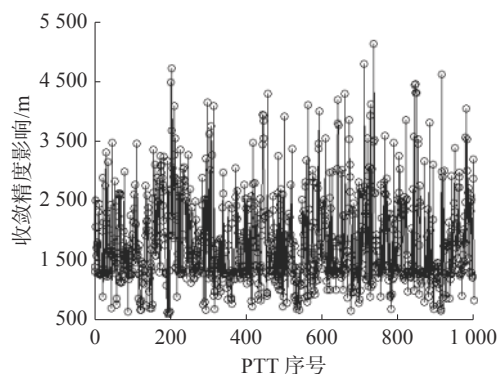
从图 5 中可知, 随着 DOP 值得增大, 解算精度恶化明显, DOP 值越小, 其解算精度相对越好。

4.2 卫星时标对位置精度的影响分析

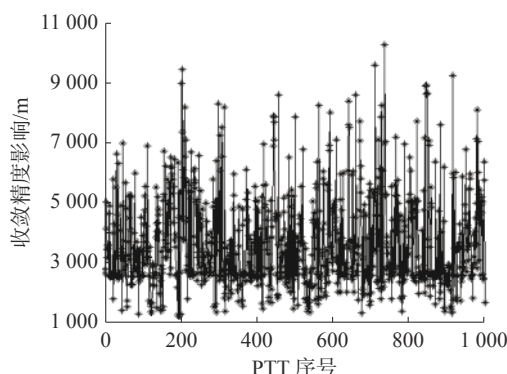
选择 1 000 个 PTT 的测量数据, 分别做 100、200、400 ms 这 3 个不同的失准化处理后, 进行仿真测试。仿真结果如图 6 所示。



(a) 100 ms 时标失准化处理后的测量精度误差



(b) 200 ms 时标失准化处理后的测量精度误差



(c) 400 ms 时标失准化处理后的测量精度误差

图 6 不同时标失准化处理后测量精度误差

Fig. 6 Measurement accuracy error after different time scale misalignment treatment

从图 6 中可以看出, 在做 100 ms 时标失准化处理后, 定位精度误差均值达到 km 级, 最大误差为 2.56 km, 最小误差为 308.13 m, 在做 200 ms 时标失准化处理后, 定位精度误差均值达到 2 km 级, 最大误差为 5.123 km, 最小误差为 616.29 m,

做 400 ms 时标失准化处理后, 定位精度误差均值达到 4 km, 最大误差为 10.25 km, 最小误差为 1.23 km。

对时标移动对定位精度的影响性质进行分析, 将上面 100 ms、200 ms、400 ms 失准化处理后的定位结果绘制于同一图中, 每隔 30 个数据抽取一个, 得到图 7 所示的定位精度统计图。

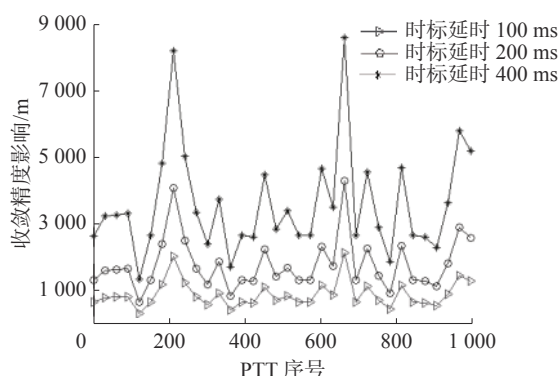


图 7 时标失准对定位精度的影响性质分析

Fig. 7 Analysis of the influence of time scale misalignment on positioning accuracy

由图 7 可见, 3 条曲线接近于平行, 即时标延时 100、200、400 ms 对 PTT 定位精度的影响基本呈现线性的变化趋势, 且由于时标失准的影响, 原本已有的误差被放大化, 时标延时是一个误差的累积过程。

4.3 其他影响因素分析

考虑电离层影响因素^[22], 当电磁波穿过充满电子的电离层时, 它的传播速度和方向会发生改变, 这种现象在光学物理中称为折射。PTT 发出的 UHF 频段信号在穿过电离层到达 DCS 载荷的过程中, 信号会发生电离层折射, 由于折射的原因, DCS 载荷的信号会在视距上存在一定偏移。接收机实际接收到的地面 PTT 信号传输距离为 r_1 , PTT 在解算过程中收到的 PTT 信号传输距离为 r_0 , 则信号的电离层延时为 $I = r_1 - r_0$ 。电离层延时的基本表达式为

$$I = FI_z \quad (11)$$

式中: F 为载波频率; I_z 表示为

$$I_z = \begin{cases} 5 \times 10^{-9} + A \cos\left(\frac{t - 50400}{T} 2\pi\right), & |t - 50400| < \frac{T}{4} \\ 5 \times 10^{-9}, & |t - 50400| \geq \frac{T}{4} \end{cases}$$

计算 DCS 卫星电离层延时, 即

$$I = I \times c$$

由图 8 可见, 电离层延时对测量精度的误差

在视距上估算小于 2.78 m, 而对于精度要求 1 km 以下的定位算法而言, 可忽略不计。

综上, 对星基数据收集系统多普勒定位反演模型及相关影响因素进行分析对比, 如表 5。综合分析结论如下:

1) 在洋流追踪应用工况下 (不依赖高度信息), 采用缺省高度约束模型能够有效实现 5 km 分辨率的 PTT 位置反演;

2) 在当前考虑的 3 种工程因素中, 时标失准因素对 PTT 位置反演精度的影响最大, 而观测量规模次之, 电离层影响几乎可以忽略不计。

表 5 不同模型 PTT 位置反演精度及影响因素汇总表

Table 5 Summary of PTT position inversion accuracy of different models and influencing factors

模型	收敛情况 (达到 5 km 分辨率数量)/%	观测量规模影响/km		时标失准影响/km		电离层影响/km	
		最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
传统模型	0/0						
数字高程约束模型	0/0						
地球表面约束模型	486/24.3	0.25	3.5	1.23	10.25	0.002 8	0.000 5
缺省高度约束模型	2 000/100						

5 结束语

本文结合海洋卫星数据收集系统下行数据, 对多普勒定位反演模型进行了改进研究, 结合海洋卫星单星测量和洋流追踪不依赖高度信息的特点, 分析对比了不同约束模型的收敛情况, 从结果可见, 缺省高度约束模型最适应该种场景应用。而针对工程应用, 有以下 2 方面结论:

1) 对于星上载荷设计, 数据收集系统时标失准问题因其对位置反演精度影响较大 (10 km 级), 因此在系统设计上最大限度提升时标精度是卫星数据收集系统设计的重点考虑要素。

2) 对于应用系统设计, 观测量规模是影响反演精度的另一个主要因素, 采用数据积累或多星重访的方式提升对同一 PTT 在相同时间段内大量观测是系统设计应考虑的重要因素。

参考文献:

- [1] 吴青, 王乐, 刘佳伦. 自主水面货船研究现状与展望 [J]. 智能系统学报, 2019, 14(1): 57-70.
WU Qing, WANG Le, LIU Jialun. Research status and prospects of autonomous surface cargo ships[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2019, 14(1): 57-70.
- [2] 盖美, 朱莹莹, 郑秀霞. 中国沿海省区海洋绿色发展测

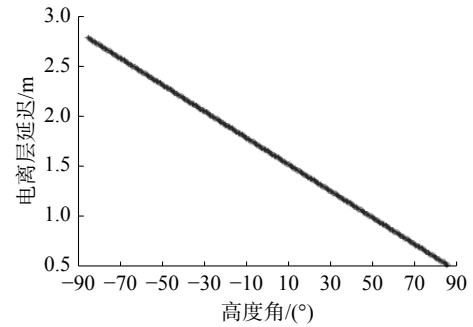


图 8 电离层延时随高度角 (0±80°) 变化情况

Fig. 8 Variation of ionospheric delay with altitude angle 0±80°

度及影响机理研究 [J/OL]. 生态学报, 2021, 41(23): 1-16[2021-07-28] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.q.20210723.1224.046.html>.

GAI Mei, ZHU Yingying, ZHENG Xiuxia. Marine green and its influence mechanism of coastal cities[J/OL]. Acta ecologica sinica, 2021, 41(23): 1-16[2021-07-28] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.q.20210723.1224.046.html>.

- [3] 王奎民. 主要海洋环境因素对水下航行器航行影响分析 [J]. 智能系统学报, 2015, 10(2): 316-323.

WANG Kuimin. Influence of main ocean environments on the navigation of underwater vehicles[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2015, 10(2): 316-323.

- [4] 胡涛, 丁永生, 曾献辉, 等. 基于 multi-Agent 技术的海洋数据智能采集与传输系统 [J]. 智能系统学报, 2009, 4(6): 508-512.

HU Tao, DING Yongsheng, ZENG Xianhui, et al. Intelligent data acquisition and transmission system for oceanic data using a multi-Agent technique[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2009, 4(6): 508-512.

- [5] DICHIERA A M, KHURSIGARA A J, ESBAUGH A J. The effects of warming on red blood cell carbonic anhydrase activity and respiratory performance in a marine fish[J]. Comparative biochemistry and physiology part A: molecular and integrative physiology, 2021, 260:

- 111033.
- [6] JONSEN I D, PATTERSON T A, COSTA D P, et al. A continuous-time state-space model for rapid quality control of argos locations from animal-borne tags[J]. *Movement ecology*, 2020, 8(1): 1–31.
 - [7] AUGER-MÉTHÉ M, DEROCHER A E. Argos and GPS data for a polar bear track[J]. *Methods*, 2021(1): 3–19.
 - [8] IRVINE L M, WINSOR M H, FOLLETT T M, et al. An at-sea assessment of Argos location accuracy for three species of large whales, and the effect of deep-diving behavior on location error[J]. *Animal biotelemetry*, 2020, 8(1): 1–17.
 - [9] SIMION I T, SHEN Juntai, KOPOSOV S E, et al. Mapping the tilt of the Milky Way bulge velocity ellipsoids with ARGOS and Gaia DR2[J]. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 2021, 502(2): 1740–1752.
 - [10] 王晓慧, 张卫民, 王品强, 等. 基于 Argo 历史观测的南海海盆尺度中层流场研究 [J]. *海洋学报*, 2018, 40(6): 1–14.
WANG Xiaohui, ZHANG Weimin, WANG Pinqiang, et al. Research on mid-depth current of basin scale in the South China Sea based on historical Argo observations [J]. *Acta oceanologica sinica*, 2018, 40(6): 1–14.
 - [11] WANG Pinqiang, ZHU Mengbin, CHEN Yan, et al. Ocean satellite data assimilation using the implicit equal-weights variational particle smoother[J]. *Ocean modeling*, 2021, 164: 101833.
 - [12] 齐小刚, 张海洋, 魏倩. 一种非视距环境下的目标定位算法 [J]. *智能系统学报*, 2021, 16(1): 75–80.
QI Xiaogang, ZHANG Haiyang, WEI Qian. A target localization algorithm in NLOS environments[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2021, 16(1): 75–80.
 - [13] 冯奇, 曲长文, 李廷军. 基于约束加权最小二乘的无源定位闭式解算方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(2): 263–268.
FENG Qi, QU Changwen, LI Tingjun. Closed-form solution for passive localization based on constrained weighted least squares[J]. *Systems engineering and electronics*, 2017, 39(2): 263–268.
 - [14] 蒋伊琳, 刘梦楠, 邵丽鹏, 等. 运动多站无源时差/频差联合定位方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(7): 1441–1449.
JIANG Yilin, LIU Mengnan, GAO Lipeng, et al. Joint passive location method of TDOA and FDOA for moving multi-station[J]. *Systems engineering and electronics*, 2019, 41(7): 1441–1449.
 - [15] 黄东华, 赵勇胜, 赵拥军, 等. 基于 DOA-TDOA-FDOA 的单站无源相干定位代数解 [J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(3): 735–744.
HUANG Donghua, ZHAO Yongsheng, ZHAO Yongjun, et al. An algebraic solution for single-observer passive coherent location using DOA-TDOA-FDOA measurements[J]. *Journal of electronics and information technology*, 2021, 43(3): 735–744.
 - [16] FENG Xuzhe, DAI Jianzhong, JIA Aiai, et al. Single star Doppler passive positioning accuracy analysis and processing based on sea state sensor[J]. *Measurement*, 2020, 155: 107555.
 - [17] AHMED M M, HO K C, WANG Gang. Localization of a moving source by frequency measurements[J]. *IEEE transactions on signal processing*, 2020, 68: 4839–4854.
 - [18] CUI Xunxue, YU Kegen, ZHANG Shaowei, et al. Closed-form geometry-aided direction estimation using minimum TDOA measurements[J]. *Signal processing*, 2021, 188: 108224.
 - [19] 宋叶志, 胡小工, 黄勇, 等. Argos 海洋浮标多普勒定位原理与方法 [J]. *飞行器测控学报*, 2011, 30(6): 82–86.
SONG Yezhi, HU Xiaogong, HUANG Yong, et al. A method of satellite Doppler positioning of Argos system[J]. *Journal of spacecraft TT and C technology*, 2011, 30(6): 82–86.
 - [20] 白建军, 赵学胜, 陈军. 基于椭球面三角格网的数字高程建模 [J]. *武汉大学学报.信息科学版*, 2005, 30(5): 383–387.
BAI Jianjun, ZHAO Xuesheng, CHEN Jun. Digital elevation modeling based on hierarchical subdivision of the triangular meshes on ellipsoidal surface[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(5): 383–387.
 - [21] 邓兵, 孙正波, 杨乐, 等. 带目标高度约束信息的 TOA 无源定位 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2017, 44(3): 133–137.
DENG Bing, SUN Zhengbo, YANG Le, et al. Geolocation of a known altitude object using TOA measurements[J]. *Journal of Xidian University*, 2017, 44(3): 133–137.
 - [22] 袁运斌, 霍星亮, 张宝成. 近年来我国 GNSS 电离层延迟精确建模及修正研究进展 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1364–1378.
YUAN Yunbin, HUO Xingliang, ZHANG Baocheng. Research progress of precise models and correction for GNSS ionospheric delay in China over recent years[J]. *Acta geodaetica et cartographica sinica*, 2017, 46(10): 1364–1378.

- [23] 袁运斌. 基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究 [D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2002.

YUAN Yunbin. Study on theories and methods of correction ionospheric delay and monitoring ionosphere based on GPS[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2002.

- [24] 袁运斌, 李敏, 霍星亮, 等. 北斗三号全球导航卫星系统全球广播电离层延迟修正模型 (BDGIM) 应用性能评估 [J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 436–447.

YUAN Yunbin, LI Min, HUO Xingliang, et al. Research on performance of BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) of BDS-3[J]. Acta geodaetica et cartographica sinica, 2021, 50(4): 436–447.

- [25] 薛伟峰, 倪育德. Kalman 滤波估算电离层延迟的一种优化方法 [J]. 空间科学学报, 2021, 41(2): 273–278.

XUE Weifeng, NI Yude. Optimization of Kalman filtering in estimating ionospheric delay[J]. Chinese journal of space science, 2021, 41(2): 273–278.

作者简介:



李申阳, 研究员, 主要研究方向为卫星通信、高精度导航。负责 863 重大专项、高新工程为代表的工程研制任务 40 余项。获国防科技进步奖 1 项、军队科技进步奖 2 项。获国家发明专利 13 项, 发表学术论文 10 余篇。



蔡霞, 工程师, 主要研究方向为卫星通信、高精度导航、智能启发式算法。



孙从容, 研究员, 现任国家卫星海洋应用中心副总工, 中法海洋卫星地面系统副总师, 海洋系列卫星地面系统接收预处理系统主任设计师, 主要研究方向为卫星数据接收处理、海洋遥感应用。发表学术论文 20 余篇。

CAAI 第七届全国大数据与社会计算学术会议 China National Conference on Big Data & Social Computing

由中国人工智能学会主办, CAAI 社会计算与社会智能专委会、浙江大学共同承办的 CAAI 第七届全国大数据与社会计算学术会议 (China National Conference on Big Data & Social Computing, 简称 BDSC2022) 将于 2022 年 7 月 21-23 日在杭州召开。该会议创建于 2012 年, 旨在搭建全国大数据与社会计算学术交流平台, 培育社会计算与社会智能学科发展, 助力社会计算与社会智能领域人才成长。

本次大会将组织专家对所有投稿论文进行双盲评审, 优秀论文将整理成论文集于 Springer、World Science Publishing 等出版社出版, 或特别优秀的论文将有机会被推荐到《Journal of Chinese Governance》、《计算机科学》等国内外高水平期刊 Special Issue (推荐期刊须二次审稿), 所有录用论文在大会上口头报告或专门墙报 (poster) 交流, 并现场评选大会“最佳论文奖”、“最佳学生论文奖”、“最佳人气论文奖”等。

大会将邀请人工智能、IoT+5G 网络、数据挖掘、地理信息以及社会科学、系统科学等交叉领域的重量级学者作大会报告, 举办相关前沿讲习班。大会致力于跨越传统学科分界, 呈现大数据智能时代社会研究新境界, 将重磅发布极具创新性的大规模社会计算试验场和社会计算开放数据集, 并举办全国社会计算大赛。

本次会议的主题为“数字化转型与共同富裕”, 面向国家经济社会发展战略, 立足数字社会构建, 通过跨学科交叉视野剖析数字化转型及其对于实现共同富裕的推动作用。本次会议面向全国开展大数据与社会计算领域的学术征文, 重点探讨数字社会的基础性、前瞻性和战略性理论及其应用, 探讨数字社会领域前沿进展, 以及探讨数字化转型与共同富裕的交互思路, 交流新的学术思想和新方法, 探索数字社会对人类发展的重要意义, 展望数字社会未来的发展趋势。

主办单位: 中国人工智能学会

承办单位: CAAI 社会计算与社会智能专委会、浙江大学公共管理学院

会议网址: <http://bdsc2022.tp13.com/>