

刘建阳, 毛志华, 陶邦一, 等. HY-1C/D 卫星中国海洋水色水温扫描仪几何定位方法[J]. 海洋学报, 2022, 44(5): 47–61, doi:10.12284/hyxb2022029

Liu Jianyang, Mao Zhihua, Tao Bangyi, et al. Geometric positioning method of HY-1C/D satellite Chinese ocean color and temperature scanner[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(5): 47–61, doi:10.12284/hyxb2022029

HY-1C/D 卫星中国海洋水色水温扫描仪几何定位方法

刘建阳¹, 毛志华^{1,2*}, 陶邦一², 马力², 朱乾坤², 黄海清², 刘建强³, 丁静³

(1. 上海交通大学海洋学院, 上海 200240; 2. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江杭州 310012; 3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 海洋一号 C/D (HY-1C/D) 卫星中国海洋水色水温扫描仪 (Chinese Ocean Color and Temperature Scanner, COCTS) 主要用于探测海洋水色、水温等要素, 这些要素需要经过卫星资料处理才能获取, 而几何定位是预处理的核心, 直接影响这些要素的质量。COCTS 具有 114° 视场角和四元逐点摆扫的特征, 据此研究出一套完整的几何定位方法。从 0 级数据中提取卫星星历, 利用插值法从中获取采样时间对应的卫星位置和速度, 进而得到轨道 (ORB) 坐标系到地心旋转 (ECR) 坐标系的转换矩阵。基于四元逐点摆扫的特征, 中心视矢量分别绕 X 轴、Y 轴旋转相应角度, 获得扫描行各采样点 ORB 视矢量, 建立视矢量与地球交叉点关系模型, 从而对根据波段数据绘制的遥感图像进行地理定位。本文使用插值法替代了传统需要 6 个轨道根数来计算卫星位置的复杂方法, 同时直接计算 ORB 到 ECR 的转换矩阵, 而不采用传统的两步转换方法。经过多组数据计算及定性定量验证, HY-1C/D COCTS 几何定位结果一致; 采样像元尺度效应导致从星下点到两侧边缘、从赤道到两极, 误差逐渐增大, 约在两个像元内。该方法满足一定的定位精度要求, 可以用于 COCTS 的几何定位。

关键词: HY-1C/D 卫星; 中国海洋水色水温扫描仪; 几何定位; 逐点摆扫

中图分类号: P715.6; P714[†].1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)05-0047-15

1 引言

20 世纪 70 年代美国发射了第一代海色探测器海岸带水色扫描仪 (CZCS), 用于监测海洋水色和浮游生物情况。搭载中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的两颗卫星 Terra 和 Aqua 分别于 1999 年 12 月、2002 年 5 月发射成功, 至今仍然在轨运行。MODIS 共有 36 个光谱波段, 其中分辨率为 250 m 的波段有 2 个, 分辨率为 500 m 的波段有 5 个, 分辨率为 1 km 的波段有 29 个, 其在 110° 的视场角内实现 2 330 km 的扫描宽度^[1]。Nishihama 等^[2] 在 1997 年提出 MODIS 几何定位

算法, 从焦平面位置开始, 经过转换与计算得到探测器坐标系下视矢量, 再经过卫星 (SC) 坐标系、轨道 (ORB) 坐标系、地心惯性 (ECI) 坐标系、地心旋转 (ECR) 坐标系转换, 得到 ECR 视矢量, 结合卫星 ECR 位置, 计算 ECR 视矢量与地球的交点, 最后转换交点为地理经纬度。

HY-1A/B 卫星水色仪的几何定位方法利用下行数据中的 GPS 数据和轨道拟合技术得到卫星轨道参数, 计算卫星在扫描时刻的 ECI 位置和速度, 结合水色扫描仪工作原理和球面几何关系, 求解扫描点在 ECI 下的位置, 过程中涉及 SC 坐标系、ORB 坐标系、

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-11-27。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1400901); 国家自然科学基金 (41621064, 41476156); 高分辨率对地观测系统重大专项 (05-Y30B01-9001-19/20-2)。

作者简介: 刘建阳 (1992—), 男, 江苏省泗阳县人, 主要从事卫星预处理的研究。E-mail: samson_liu@sjtu.edu.cn

* 通信作者: 毛志华 (1966—), 男, 研究员, 主要从事海洋遥感的研究。E-mail: mao@sio.org.cn

ECI 坐标系的转换, 然后再转到 ECR 坐标系, 最后计算出扫描点的地理经纬度^[3]。HY-1A/B 卫星水色仪与 MODIS 几何定位的区别在于, 一是利用 GPS 数据和轨道拟合技术来计算卫星的位置和速度, 二是未采用视矢量。

风云三号(FY-3)卫星微波成像仪采用天线绕轴旋转形成圆锥形跨轨的扫描方式, GPS 接收机提供卫星三维位置, 利用两组以上卫星位置计算出卫星的 ECI 实时速度。根据探测器观测几何、探测器空间位置和指向, 建立观测像元与地面位置的关系模型。先将计算的天线视矢量经过坐标系转换, 生成 ECR 视矢量, 然后结合卫星 ECI 位置到 ECR 位置的转换, 即可计算出 ECR 视矢量与地球的交点, 最后再把交点转换成地理经纬度^[4]。不同于 MODIS, FY-3 微波成像仪根据 GPS 数据中卫星位置计算速度。

以上几种探测器的几何定位方法一致, 关键过程是计算出探测器视线与地球椭球体的交叉点, 过程涉及坐标系转换与计算, 最后转化为地理经纬度。该几何定位方法同样应用于陆地遥感卫星多光谱扫描仪(MSS)、可见光红外成像辐射仪(VIIRS)、甚高分辨率扫描辐射计(AVHRR)等探测器中^[5], 应用过程中存在各种变形和改进, 如传感器视线呈现形式不同, 获得卫星位置速度的方式不同, 初始视矢量所在坐标系不同, 坐标变换步骤不同, 经纬度计算公式不同等。

潘德炉等^[6]在 1997 年提出了基于卫星轨道参数和探测器观测角的几何定位方法, 用于卫星仿真, 既不采用地面控制点, 也不采用插值法近似逼近。根据先验知识获得的已知点作为地理参考点, 利用卫星轨道参数和探测器观测角等参数把图像平面坐标依次转化为以星下点为球心的球面坐标、以星下点为极点的极坐标、以北极为极点的极坐标, 最后转化为像元地理坐标, 未采用常规坐标系。研究过程中通过逐步逼近法, 推算出所有行的中心像元点地理坐标和卫星飞行方向, 以此减少误差。

2018 年 9 月 7 日, 我国在太原卫星发射中心成功发射 HY-1C 卫星, 2020 年 6 月 11 日又成功发射 HY-1D 卫星, 两星组网, 进一步提高了全球海洋水色、海洋带资源与生态环境的有效观测能力。作为 HY-1A/HY-1B 卫星的后继者, HY-1C/D 卫星的正常运行标志着海洋一号系列卫星业务化运行的成功。HY-1C/D 卫星搭载中国海洋水色水温扫描仪(COCTS), COCTS 几何定位是遥感资料预处理的核心要求, 需要通过方法研究来提高定位精度, 精确的地理定位数据可以提高 COCTS 后续产品的质量。

2 COCTS 观测特性

2.1 COCTS 介绍

HY-1C/D 卫星搭载 5 个有效载荷, 本文重点研究其中的水色仪 COCTS。COCTS 重达 50 kg, 功率为 70 W, 数据传输速率为 670 kb/s。COCTS 以 1 km 的空间分辨率、114°的全视域角、2 900 km 的地面幅宽扫描监测中国邻海以及全球海洋, 提供了海洋水色、植被产品以及海表温度等数据。沿着 HY-1C/D 卫星飞行方向, COCTS 从右向左扫描, 四元同步逐点摆扫, 每元有 1 664 个采样点, 每个采样点有 10 个波段(B1-B10), 包括 8 个可见波段和近红外波段、2 个热红外波段。水色仪地球区图像数据传输格式如表 1 所示。

表 1 COCTS 地球区图像数据传输格式

Table 1 COCTS earth area image data transmission format

第1元第1 采样点	...	第4元第1 采样点	...	第1元第1 664 采样点	...	第4元第1 664 采样点
B1...B10	...	B1...B10	...	B1...B10	...	B1...B10

2.2 地面景物与 COCTS 成像几何关系

COCTS 采用 45°扫描镜和四元探测器扫描成像形式, 其扫描方向表示为 +Y, 指向地心方向表示为 +Z, 飞行方向表示为 +X, 垂直于 Y 轴、Z 轴所在平面指向外侧, 建立的坐标系如图 1 所示。COCTS 每 360°扫描周期内都有一段对地球区进行扫描成像, 图 1 中地球区以星下点为中心, 左右各转 57°, 即从成像开始逆时针旋转 114°的区域。COCTS 安装在卫星载荷舱对地面, 依靠 45°扫描镜穿轨方向的扫描和卫星的飞行, 获取地球区图像数据, 10 波段焦平面与地

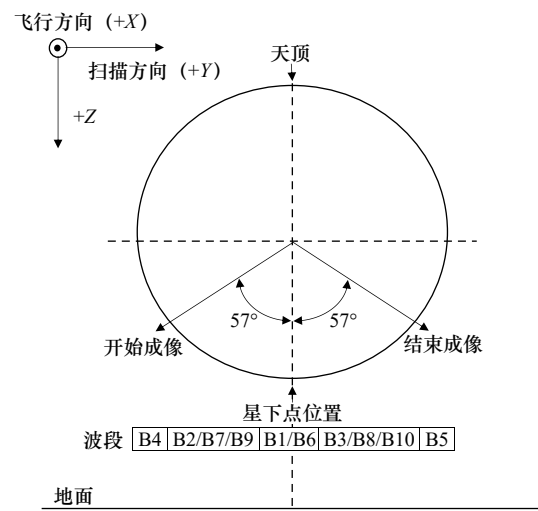


图 1 水色仪 COCTS 周期扫描成像几何关系示意

Fig. 1 Diagram of the geometric relation of COCTS periodic scanning imaging

面景物成像几何关系如图1, 获取的波段数据将用于后续遥感图的绘制。

3 几何定位方法

本文提出的 COCTS 几何定位方法算法流程如图2所示。首先, 构建 ORB 到 ECR 的转换矩阵 $T_{\text{ECR/ORB}}$ 。从 0 级数据中提取星下点计数值, 计算出星下点时间, 根据相邻采样时间关系计算出各点采样时间。在提取的星历数据中采用插值法获取各采样时间对应的 ECR 卫星位置和速度, 通过在 ECR 坐标系中建立 ORB 坐标系来构造 ORB 到 ECR 的转换矩阵 $T_{\text{ECR/ORB}}$ 。

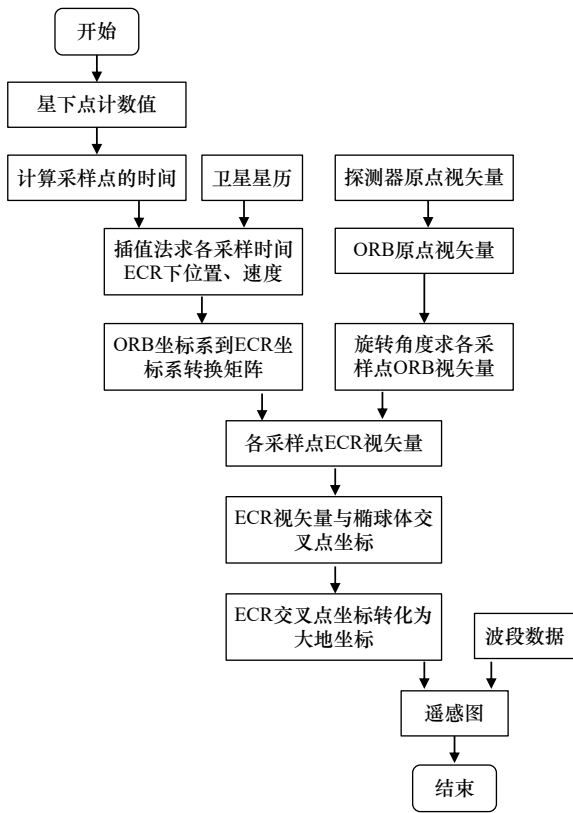


图2 COCTS 几何定位方法流程

Fig. 2 Flow chart of COCTS geometric positioning method

其次, 计算扫描行各采样点的 ORB 视矢量。探测器 (INST) 坐标系下原点视矢量为 $OZ=[0, 0, 1]$, 忽略仪器安装误差, 理论上认为安装矩阵是单位矩阵。INST 到 SC 坐标系转换矩阵 $T_{\text{SC/INST}}$ 为单位矩阵, 热胀冷缩是影响该矩阵动态误差的因素, 误差相对较小且难被分析, 可忽略。SC 到 ORB 坐标系转换矩阵 $T_{\text{ORB/SC}}$ 由卫星姿态决定, 使用 HY-1C/D 卫星双传感器与陀螺的搭配来确定卫星姿态, 精度更高, 稳定性更好, 故本文采用基于扩展卡尔曼滤波 (EKF) 姿态确定算法, 分成两个子系统进行研究^[7]。由于此方法难度较大, 本文暂时将 $T_{\text{ORB/SC}}$ 简单视为单位矩阵, 所以 ORB 坐标系原点视矢量为 $OZ=[0, 0, 1]$, 扫描行的各

采样点 ORB 视矢量可以通过将原点视矢量绕 X、Y 轴旋转相应角度的方式来获得。

然后, 计算采样点 ECR 视矢量与地球椭球体的交叉点, 并转换为地理经纬度。结合转换矩阵 $T_{\text{ECR/ORB}}$, 进一步计算出各采样点的 ECR 视矢量, 建立 ECR 视矢量与地球椭球体交叉模型, 从而求解出交叉点 ECR 坐标, 利用英国学者鲍林的研究思路导出的公式即可转换交叉点 ECR 坐标为地理经纬度^[8]。

最后, 结合波段数据绘制遥感图。根据上述过程计算的各采样点经纬度以及提取的对应波段数据, 设置像元尺度, 投影各采样点, 各投影像元匹配对应采样点的平均波段数据, 据此可以绘制遥感图。

3.1 坐标系及转换矩阵 $T_{\text{ECR/ORB}}$ 的构建

在水色仪 COCTS 几何定位算法中, 涉及到 3 个主要坐标系, 分别是 ORB 坐标系、ECR 坐标系、GEO 坐标系, 坐标系及几何定位示意图如图3所示。ORB 坐标系基于惯性空间的卫星位置, 以卫星质心为中心, Z 轴从卫星质心指向地球质心, Y 轴是 Z 轴与瞬时速度矢量的标准叉乘, X 轴为 Y 轴与 Z 轴的标准叉乘。

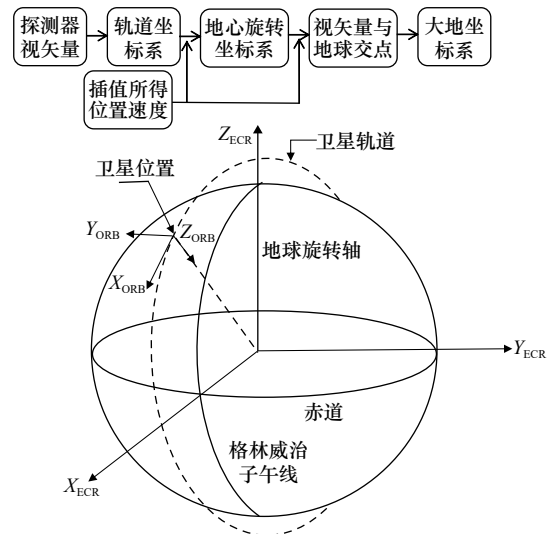


图3 坐标系及几何定位示意

Fig. 3 Coordinate system and geometric positioning diagram

ECR 坐标系以地球质心为起点, X 轴从地球质心指向格林威治子午线与赤道的交点, Z 轴从地球质心指向北半球极点, Y 轴为 Z 轴与 X 轴的叉乘, ECR 坐标系是一个空间直角坐标系, 所以某点空间位置可以用该点在坐标轴上的投影值来表示。

GEO 坐标系是基于 WGS-84, 用经度、纬度表示坐标的坐标系。经度定义为本地子午线与格林威治子午线的夹角, 格林威治子午线向东为正, 称为东经, 向西为负, 称为西经, 变化范围是环全球经度; 纬度定义为椭球体法线与赤道的夹角, 向北为正, 称为北纬, 向南为负, 称为南纬, 变化范围是 $90^{\circ}\text{S} \sim 90^{\circ}\text{N}$ ^[8]。

传统的 ORB 到 ECR 坐标系的转换需要两个步骤, 一是从 ORB 转换到 ECI, 该过程需要用到卫星的 ECI 位置和速度; 二是从 ECI 转换到 ECR, 该过程需要考虑地球的自转、极移、章动、进动等因素的影响^[9]。由于地球方位信息动态变化, 所以需要实时从国际地球自转和参考系服务网站获取更新的信息。

传统方法较为复杂, 考虑因素较多, 并且需要实时更新信息, 因此采用一种简捷、不需实时获取更新信息的直接转换方法显得尤为必要。本文根据卫星的 ECR 位置和速度, 建立了 ORB 与 ECR 的联系, 本质上是 ECR 坐标系分别绕着 3 个坐标轴旋转一定角度, 最终转换到 ORB 坐标系。假设某一时刻卫星的 ECR 位置和速度分别为 P_{ECR} 、 V_{ECR} , 则 ORB 坐标系的单位矢量计算如下^[10]:

$$Z_{\text{ORB}} = -P_{\text{ECR}}/|P_{\text{ECR}}|, \quad (1)$$

$$Y_{\text{ORB}} = Z_{\text{ORB}} \times V_{\text{ECR}}/|Z_{\text{ORB}} \times V_{\text{ECR}}|, \quad (2)$$

$$X_{\text{ORB}} = Y_{\text{ORB}} \times Z_{\text{ORB}}, \quad (3)$$

则 ORB 到 ECR 的转换矩阵为 $T_{\text{ECR/ORB}} = [X_{\text{ORB}} \ Y_{\text{ORB}} \ Z_{\text{ORB}}]$ 。

3.2 插值算法

星下点位置是地球采样区的中间位置, 从 0 级辅助数据中提取星下点时间计数值, 计算出星下点时间, 相邻采样点间隔 124 μs , 所以根据相邻采样时间关系可以推导出各点采样时间, 本节插值算法即是针对采样时间进行的。从 0 级 GPS 定位广播数据中提取并计算出 GPS 绝对定位时间以及对应的卫星 ECR 位置和速度, 但是由于重复的数据较多, 无法直接用于后续的插值算法, 所以需要先进行重复数据的剔除处理。

卫星位置的每一个元素被当作独立的一维函数, 速度作为其函数的一阶导数; 每组位置和速度组合起来进行插值, 从而保证插值位置和速度的一致性。从 0 级辅助数据中提取的 GPS 时间都是整数时间, 相邻间隔为 1 s, 每个时间对应一组三维 ECR 位置和速度, 使用插值法计算各采样时间对应的卫星 ECR 位置和速度, 在 GPS 时间范围外的采样时间无法进行插值计算。插值法示意如图 4 所示。

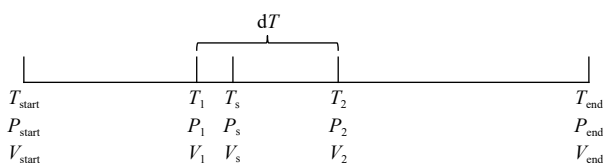


图 4 插值法示意
Fig. 4 Diagram of insertion method

为计算采样时间 T_s 对应的卫星 ECR 位置和速度, 在参考时间中找到采样时间 T_s 的两个最近相邻整数

时间 T_1 、 T_2 , dT 是相邻时间 T_1 、 T_2 之差, 根据时间 T_1 、 T_2 及其对应的位置 P_1 、 P_2 和速度 V_1 、 V_2 , 计算多项式系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 , 公式如下^[11]:

$$a_0 = P_1, \quad (4)$$

$$a_1 = dT \times V_1, \quad (5)$$

$$a_2 = 3(P_2 - P_1) - dT \times (2V_1 + V_2), \quad (6)$$

$$a_3 = 2(P_1 - P_2) + dT \times (V_1 + V_2). \quad (7)$$

两个位置 P_1 、 P_2 是连续相邻的, 两个速度 V_1 、 V_2 也是连续相邻的。为了插入到合适的点, 对采样时间 T_s 进行归一化处理, 转化为 0 与 1 之间的数值:

$$T = (T_s - T_1)/dT. \quad (8)$$

最后采样时间对应的卫星 ECR 位置、速度计算公式如下:

$$P_{\text{ECR}} = a_0 + a_1 \times T + a_2 \times T^2 + a_3 \times T^3, \quad (9)$$

$$V_{\text{ECR}} = (a_1 + 2a_2 \times T + 3a_3 \times T^2)/dT. \quad (10)$$

3.3 各采样点 ECR 视矢量的构建

针对 ORB 坐标系下视矢量的求解, 以下降过程为例加以说明, 如图 5 所示, 交点表示水色仪扫描地面所采样的 $4 \times 1\ 664$ 个点。沿着卫星运行方向, COCTS 探头从右向左扫描, 图 5 中最左边是第 1 列, 最右边是最后一列; 每扫描行有四元即 4 个探头, 从下向上分别是第一元到第四元。坐标原点设置在正中间位置, 卫星运行方向表示 X 轴正方向, 扫描方向表示 Y 轴正方向, 构建图 5 所示的右正左负、下正上负坐标系。假设 Z 轴垂直 X 、 Y 轴所在平面指向地面, 则水色仪在 origin 处 ORB 视矢量可视为 $OZ = [0, 0, 1]$ 。

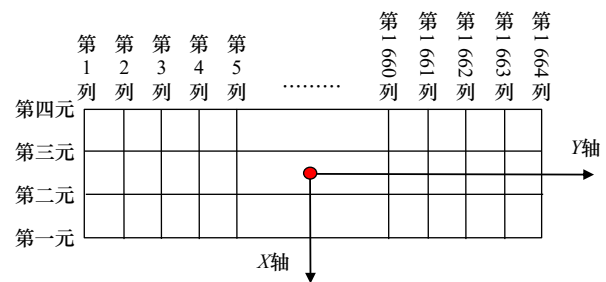


图 5 水色仪降 COCTS 轨扫描示意
Fig. 5 Diagram of COCTS downward scanning

扫描行每元都有 1 664 个采样点, 各列采样通过 COCTS 探头在太空中旋转一定角度来实现。以星下点为中心, COCTS 探头向左、向右最大旋转角度设计值都是 57° , 在空中的整个视域角为 114° , 实际在轨运行时视域角约为 116° 。COCTS 旋转扫描一圈的周期为 640 ms, 每个周期对应 360° , 相邻采样点扫描间隔为 124 μs , 那么相邻列之间旋转角 $\text{roll} = 124/(640\ 000) \times 2\pi$, 原点 ORB 视矢量需要绕 X 轴旋转角度 $\text{XR} = \text{roll} \times [831.5, -1, -831.5]$ 来获得各列视矢量; X 轴方向上的最小旋转角度 $\text{pitch} = 0.001\ 38$, 原点 ORB 视矢量需要

绕 Y 轴旋转角度 $YR = \text{pitch} \times [1.5, 0.5, -0.5, -1.5]$ 来获得各元视矢量。所以各采样点 ORB 视矢量根据原点视矢量 OZ 分别绕 X 轴、 Y 轴旋转一定角度来获得^[12], 每扫描行共计 $4 \times 1\ 664$ 个视矢量, 即为 ORB 坐标系下的视矢量 u_{ORB} 。

利用 3.1 节构建的 ORB 到 ECR 转换矩阵 $T_{ECR/ORB}$, 则 ECR 坐标系下各采样点视矢量计算如下:

$$u_{ECR} = T_{ECR/ORB} \times u_{ORB} = [X_{ORB} \ Y_{ORB} \ Z_{ORB}] \times u_{ORB}. \quad (11)$$

3.4 ECR 视矢量与地球交叉算法

利用地球椭球体长半轴 a 、短半轴 b 重新调节 ECR 视矢量 u_{ECR} 和卫星位置矢量 p_{ECR} , 下列等式未考虑光传输时间和因卫星移动或相对效应造成的异常, 这将导致一点系统性的偏差。

$$u' = \begin{bmatrix} u_{ECR1}/a \\ u_{ECR2}/a \\ u_{ECR3}/b \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$p' = \begin{bmatrix} p_{ECR1}/a \\ p_{ECR2}/a \\ p_{ECR3}/b \end{bmatrix}. \quad (13)$$

使用二次方程式求解与单位球面交叉的视矢量 u' 的缩放系数 d , 下式 d 是两个交点中靠近卫星的一个解, 即较小的那个解, 再使用 d 计算椭球体交叉矢量 x 。

$$d = \frac{-(u'p') - \sqrt{(u'p')^2 - |u'|^2(|p'|^2 - 1)}}{|u'|^2}, \quad (14)$$

$$x = p_{ECR} + du_{ECR}. \quad (15)$$

所以, 根据 ECR 视矢量 u_{ECR} 、卫星位置矢量 p_{ECR} 以及推算出的缩放系数 d , 可以计算出 ECR 视矢量与地球椭球体交叉点坐标 $p_{ECR} + du_{ECR}$, 即在 ECR 空间直角坐标系下的坐标。

3.5 ECR 到 GEO 坐标系转换

ECR 到 GEO 坐标系转换是根据英国科学家鲍林研究思路推演而成的计算公式, 把 ECR 坐标系下的坐标 (X, Y, Z) 转化为大地坐标, 即地理经纬度^[8]。 a 、 b 分别为地球椭球体的长半轴、短半轴; f 为椭球扁率; 据此计算椭球第一偏心率平方 e^2 、第二偏心率平方 e'^2 :

$$e^2 = 2f - f^2, \quad (16)$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}. \quad (17)$$

再根据 e^2 、 e'^2 , 计算辅助参数 u :

$$u = \arctan \left[\frac{bZ}{a\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 + e'^2 \frac{b}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right) \right], \quad (18)$$

则大地经度 (Lon)、纬度 (Lat) 可表示为

$$\text{Lon} = \arctan \frac{Y}{X}, \quad (19)$$

$$\text{Lat} = \arctan \frac{Z + Be'^2 \sin(u)^3}{\sqrt{X^2 + Y^2} - ae^2 \cos(u)^3}. \quad (20)$$

本文未考虑地形对于几何定位精度的影响, 根据后文对几何定位结果的验证, 可以得知地形校正前该几何定位方法对经纬度误差的影响程度, 并且在后续的研究中使用数字高程模型 DEM 对地形加以校正, 从而减少误差。

4 结果验证

在环全球经度范围, 纬度范围 $90^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{N}$ 的地图上, 进行网格化处理, 横向经度分成 36 000 个格子, 纵向纬度分成 18 000 个格子, 最终形成方格边长为 0.01° 的 $36\ 000 \times 18\ 000$ 网格, 表征经度范围为 360° 、纬度范围为 180° 的投影地图。上述几何定位方法计算出的经纬度, 可以转化为在网格中的行列号, 再转化行列号为在网格中的序号, 网格按从上向下, 从左向右顺序标序号。把投影在同一网格序号中的采样点的 R、G、B 波段数据分别取平均, 表示该网格序号对应的三波段数据, 最后显示得到赤道区域分辨率约为 1 km 的彩色遥感图。

选择 COCTS 从 2020 年 10 月 27 日 02:33:00 UTC 开始扫描到 12:35:00 UTC 结束的 0 级数据, 卫星在该段时间内共绕地运行 6 轨, 扫描范围可以覆盖欧亚非区域。按上述方法计算该区域的经纬度以及提取波段数据, 作图 6a 所示欧亚非大陆遥感图, 图 6a 为 1 km 分辨率遥感图, 1 km 高分辨率体现地图的精细化信息, 根据遥感图估算的经纬度数据也更加准确。MODIS 1 级产品光谱分辨率有 250 m、500 m、1 000 m 3 种模式, 图 6b 为相同区域的 MODIS 遥感图。从图 6 可以看出, COCTS 与 MODIS 遥感图轮廓大体一致。

4.1 HY-1C 卫星 COCTS 与 MODIS 海岸线定性比较

选择阿拉伯半岛和渤海湾两区域进行海岸线定性验证。阿拉伯半岛海陆分界线轮廓清晰, 经过 Canny 边缘检测、人工优化处理即可提取海岸线, 然后进行后续的轮廓匹配; 而渤海湾区域具有光谱反射率低、上空多云多雾等特征, 造成陆海分界线在视觉上不明显, 需要先对波段数据进行归一化植被指数 (NDVI) 处理, 以此增强海陆色度差, 提高区分度, 再实施 Canny 边缘检测、人工优化来提取海岸线^[13], 最后对提取的海岸线进行轮廓匹配。

1) NDVI 处理

NDVI 是衡量植被覆盖率的一个参数, 根据 NIR 和 R 两个波段反射值之差与之和的比来计算, 范围处于 -1 与 1 之间。根据 R、NIR 波段范围, 从 COCTS

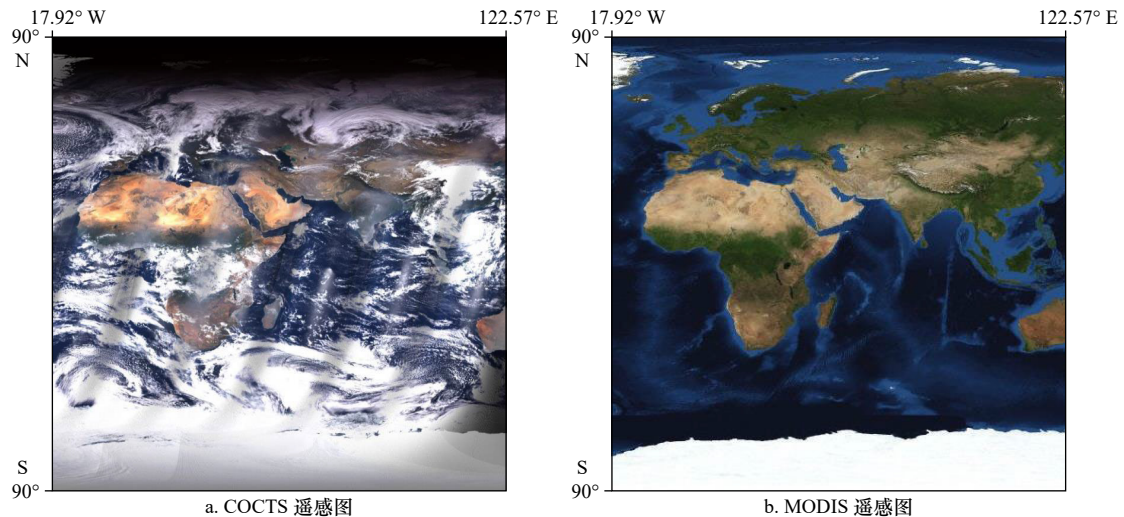


图 6 欧亚非大陆遥感图

Fig. 6 Remote sensing image of Europe, Asia and Africa

的 10 个波段中分别选择第 6、8 波段来计算 NDVI, 正值表征植被, 植被覆盖率越高, NDVI 越大。通过对 NDVI 进行适合阈值设定, 从而剔除绝大部分白云、水、岩石、裸土以及绿色植被覆盖较少的地方, 剩下的深绿区域植被覆盖率较高^[14-15]。

2) Canny 边缘检测

首先, 高斯滤波确定高斯核的尺寸为 5×5 , 标准差为 0.5, 与图像进行离散卷积; 其次, 考虑到 Sobel 算子边缘强弱分明, 抗噪声好, 选定该算子计算 X 方向和 Y 方向像素梯度; 然后, 将当前像素梯度强度与沿正负梯度方向上的相邻像素梯度强度进行比较, 抑制非极大值像素梯度, 消除边缘检测带来的杂散响应; 最后, 设置高低阈值, 定义真实边缘点^[16-18]。

3) 人工优化

经过前面两步处理, 海陆交界处像素梯度显著, 所以海岸线被提取得很好。然而海岸图仍有尚未剔除的干扰线段, 所以最后需要对海岸图进行人工优化, 用干扰线段附近的图像数据取代干扰区域, 从而屏蔽干扰线段, 得到最终清晰的海岸线。

4.1.1 区域 1——阿拉伯半岛

根据 MODIS 在 2020 年 10 月 27 日的 1 级产品画出 1 km 空间分辨率的阿拉伯半岛地区遥感图, 如图 7a 所示。对其进行 Canny 边缘检测, 调整阈值参数, 得到图 7b, 该海岸线还存在干扰线段, 因此还需进行人工优化, 剔除噪声干扰, 优化如图 7c 或图 7d 所示, 该图即为根据 MODIS 数据最终提取的阿拉伯半岛地区海岸线。从 2020 年 10 月 27 日 05:54:23 UTC 至 09:15:17 UTC, COCTS 绕地运行两轨, 覆盖阿拉伯半岛, 该时间段的 0 级数据按上述方法计算出 1 级数据,

据此作遥感图 7e, 与图 7a 同样经纬度范围。利用 CorelDRAW 软件把图 7d 海岸线叠加到图 7e 遥感图中, 通过调整透明度进而验证海岸线吻合情况, 因此从图 7f 中可以定性判断 MODIS 白色海岸线与 HY-1C 卫星 COCTS 遥感图海岸线匹配一致, 二者变化趋势吻合。

4.1.2 区域 2——渤海湾

COCTS 从 2020 年 10 月 19 日 02:12:25 UTC 至 02:22:37 UTC 扫描探测渤海湾区域, 该时间段对应的 0 级数据按上述几何定位方法计算出经纬度, 提取波段信息, 据此作 1 km 分辨率遥感图, 依次进行图 8 所示处理。图 8e 为根据同一天的 MODIS 1 级产品作同一经纬度区域的遥感图, 图 8f 为 COCTS 提取的海岸线与 MODIS 遥感图海岸线轮廓匹配结果, 因此可以定性判断 COCTS 白色海岸线与 MODIS 遥感图海岸线匹配一致, 二者变化趋势吻合。

4.2 HY-1C 卫星 COCTS 海岸线经纬度与 GSHHG 数据库定量比较

GSHHG 是全球一致、分层、高分辨率地理数据库, 由 3 个数据库构成: 世界矢量海岸线、世界数据库 II 和冰冻圈地图集, 分别是海岸线、湖泊和南极海岸线的基础。GSHHG 地理数据分辨率有 5 个级别, 选取最高分辨率“full”模式。因为“high”模式空间分辨率为 200 m, “full”模式所占磁盘空间是“high”模式的 4 倍多, 所以“full”分辨率是优于 50 m 的^[19]。为了检验几何定位的精度, 根据几何定位方法计算的结果作 1 km 分辨率遥感图, 从 GSHHG 数据库中提取相同区域的海岸线坐标, 在该遥感图上叠加相应的海陆分界线, 该海路分界线即为参考, 通过其与实际遥感图

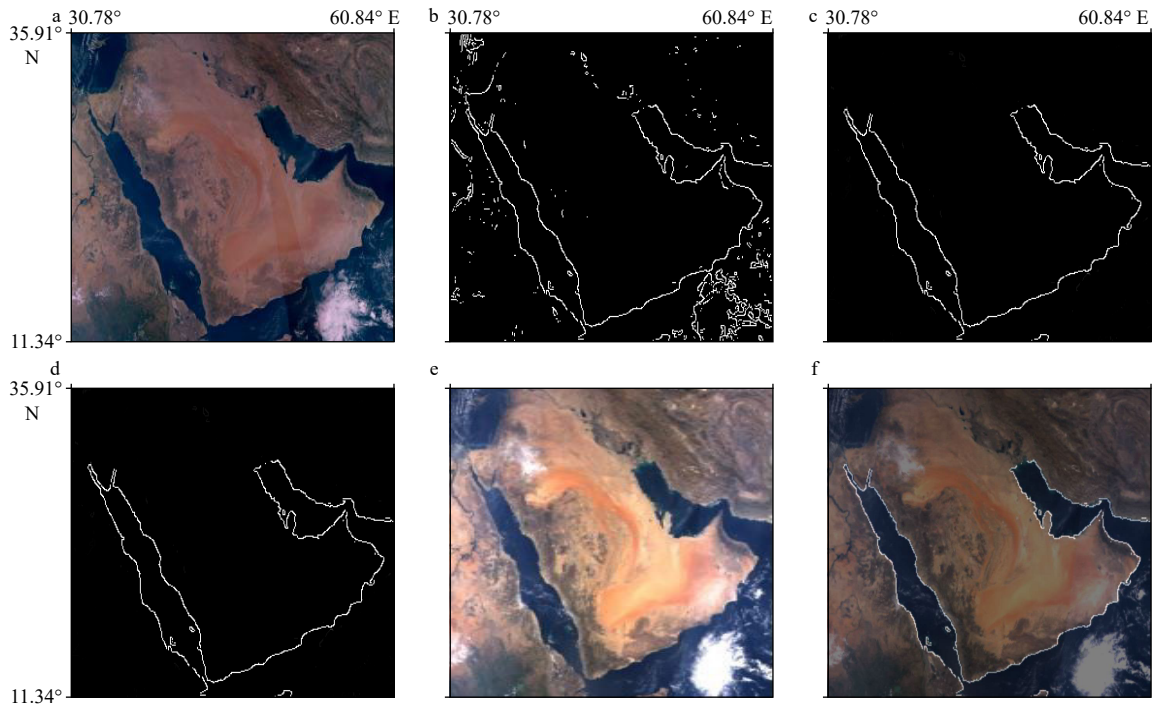


图 7 阿拉伯半岛海岸线提取与匹配

Fig. 7 Extraction and match of coastline in the Arabian Peninsula

a. MODIS 遥感图; b. Canny 边缘检测; c, d. 人工优化; e. COCTS 遥感图; f. 海岸线匹配

a. MODIS remote sensing image; b. Canny edge detection; c, d. artificial optimization; e. COCTS remote sensing image; f. coastline match

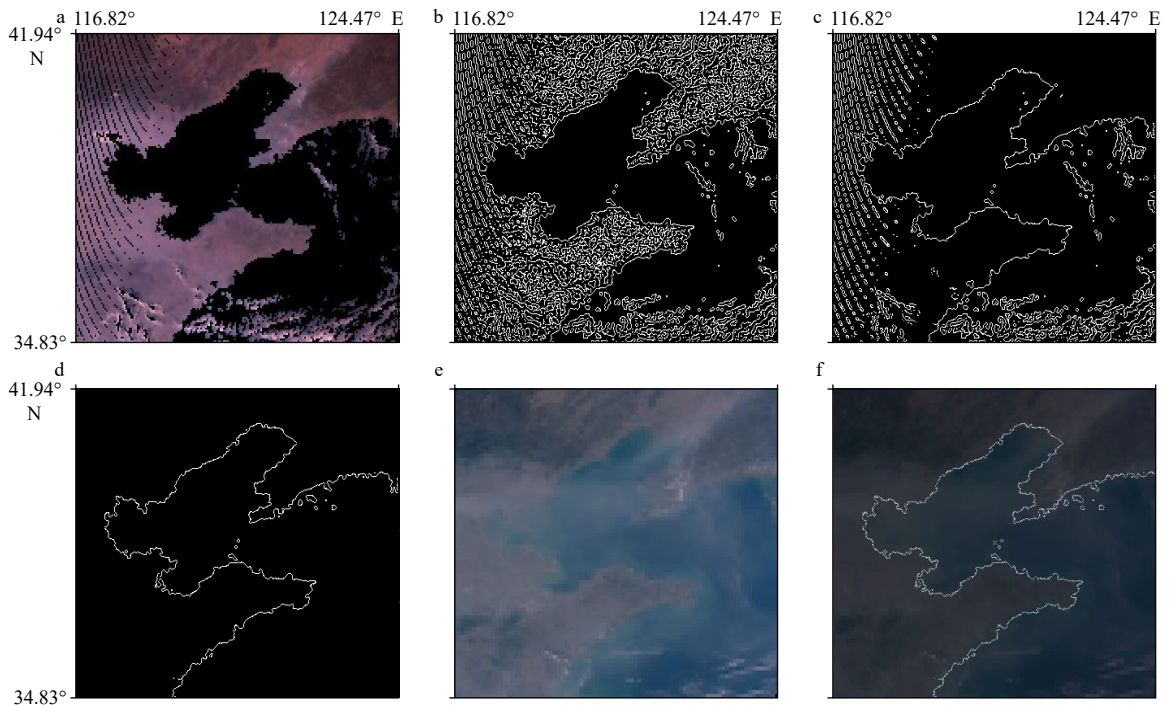


图 8 渤海湾海岸线提取与匹配

Fig. 8 Extraction and match of coastline in the Bohai Gulf

a. NDVI 处理; b. Canny 边缘检测; c. 参数调整; d. 人工优化; e. MODIS 遥感图; f. 海岸线匹配

a. NDVI processing; b. Canny edge detection; c. parameter adjustment; d. artificial optimization; e. MODIS remote sensing image; f. coastline match

海岸线的吻合程度来判断几何定位的精度。

阿拉伯半岛的数据,作 1 km 分辨率遥感图(图 9a)。

选择上述 COCTS 在 2020 年 10 月 27 日扫描覆盖

选定阿拉伯半岛区域重点研究,用海岸线提取工具,

选定始末坐标, 开始于 35.91°N , 30.78°E , 结束于 11.34°N , 60.84°E 。该始末坐标范围内的海岸线坐标都可以提取出来, 叠加到图 9a 中, 红色即为参考海岸线。选取中间区域的波斯湾北部, 进一步放大如图 9b 所示; 选取两侧区域的波斯湾东南部, 进一步放大如图 9c 所示, 由此二图可以清晰看到像元级别。由于 COCTS

的扫描特征, 越靠近扫描区域的两侧, 采样越稀疏, 采样不足导致存在无效数据点, 在遥感图上体现为黑色像元点。红色参考海岸线与实际作的遥感图海岸线吻合程度反映了几何定位精度, 如图 9 所示, COCTS 几何定位方法计算的经纬度误差在 2 个像元内, 即 2 km 内。

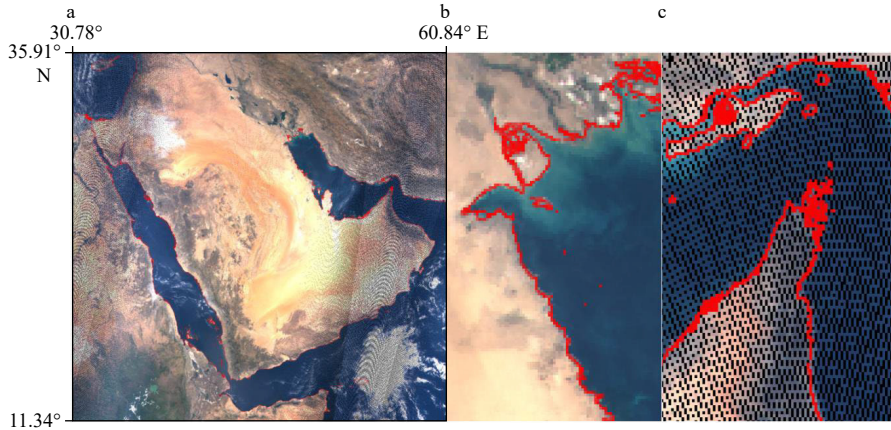


图 9 阿拉伯半岛遥感图参考海岸线叠加(a), 星下点附近中间放大区域(b), 星下点两侧边缘放大区域(c)

Fig. 9 Reference coastline overlaying Arabian remote sensing image (a), middle enlargement area near Nadir (b), marginal enlargement area away from Nadir (c)

4.3 HY-1C 卫星 COCTS 星下点经纬度与卫星工具软件结果定量比较

成熟的卫星工具软件 (Satellite Tool Kit, STK) 是航天领域先进的系统分析软件, 用于分析复杂的陆地、海洋等任务以及提供精确的分析报告。高精度轨道生成模块考虑点重力模型、日月重力影响、大气阻力、章动、自旋、质心变化等很多因素, 以此确保生成高精度轨道。

选择某一区域数据, 从 0 级文件中提取 GPS 时间及对应的位置和速度, 利用 STK 软件的高精度轨道生成模块模拟卫星轨道, 然后根据输入的星下点时间, 输出对应的卫星位置和速度。利用获得的星下点时间、位置、速度在 STK 软件上再次模拟出卫星轨道, 星下点作为特征点, 一个星下点时间对应一组星下点经纬度。然后导出 LLA 文件, 文件中包括星下点经纬度^[20-21], 该数据作为参考标准, 与本文几何定位方法计算的星下点经纬度进行比较和分析。

首先选择 COCTS 从 2020 年 10 月 19 日 02:12:25 UTC 至 02:22:37 UTC 扫描覆盖渤海湾区域的 0 级数据, 利用上述定位方法计算 957 组星下点经纬度, STK 输出对应的参考值。计算值与参考值对比结果为, 误差在 $0.001^{\circ}\sim 0.01^{\circ}$ 之间的星下点占 22.46%, 误差在 $0.01^{\circ}\sim 0.02^{\circ}$ 之间的星下点占 77.54%, 误差在 2 个像

元内。再选取长时间大范围的数据, 选择 COCTS 从 2020 年 10 月 27 日 07:34:50 UTC 至 09:15:17 UTC 扫描经过阿拉伯半岛的一整轨 0 级数据, 同样方法计算出 9 418 组星下点经纬度以及输出 STK 对应参考值。为了进一步对比分析, 把数据分成南北纬 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、南北纬 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、南北纬 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 共低、中、高纬 3 部分, 计算值与参考值对比, 误差占比统计结果如表 2 所示。分析星下点误差可知, 本文几何定位方法计算的星下点误差都在 0.02° 内, 即 2 个像元内; 从低纬到高纬误差变化趋势可以判断, 赤道误差最小, 越往两极, 误差越大。

4.4 HY-1D 卫星与 HY-1C 卫星 COCTS 经纬度定量比较

HY-1D 卫星与 HY-1C 卫星功能一致, 共同监测全球水色和海表温度, 两颗卫星组网, 提高全球扫描

表 2 计算值与参考值误差统计

Table 2 Error statistics between calculated and reference values

占比误差	范围		
	$0^{\circ}\sim 30^{\circ}(\text{S/N})$	$30^{\circ}\sim 60^{\circ}(\text{S/N})$	$60^{\circ}\sim 90^{\circ}(\text{S/N})$
$(-\infty, 0.001^{\circ})$	4.17%	2.10%	0%
$[0.001^{\circ}, 0.01^{\circ})$	42.57%	34.37%	28.62%
$[0.01^{\circ}, 0.02^{\circ})$	53.26%	63.53%	71.38%

覆盖能力,共同构成中国首个海洋民用卫星星座。两星搭载同样的水色仪 COCTS, COCTS 的硬件结构、运行模式和工作原理等完全一致。HY-1D 卫星与 HY-1C 卫星的区别是,在遥感图上 HY-1D 卫星从右下往左上运行成像,而 HY-1C 是从右上往左下运行成像。

将 2020 年 9 月 23 日 HY-1D COCTS 的遥感图与上述 2020 年 10 月 27 日 HY-1C COCTS 的遥感图

进行比较。选择波斯湾西部一个特征小区域,遥感图放大 6 倍,如图 10 所示,图 10a 为 HY-1C 特征区域,图 10b 为 HY-1D 卫星特征区域,两图中红色像元点为用于定量比较的选取点,把选取点在全球范围遥感图中的行列号记录在表 3。经统计,在 1 km 分辨率前提下,HY-1C 卫星与 HY-1D 卫星的纬度、经度之差都为 0 像元,所以 COCTS 几何定位方法对 HY-1D 卫星与 HY-1C 卫星都适用,二者定位结果一致。

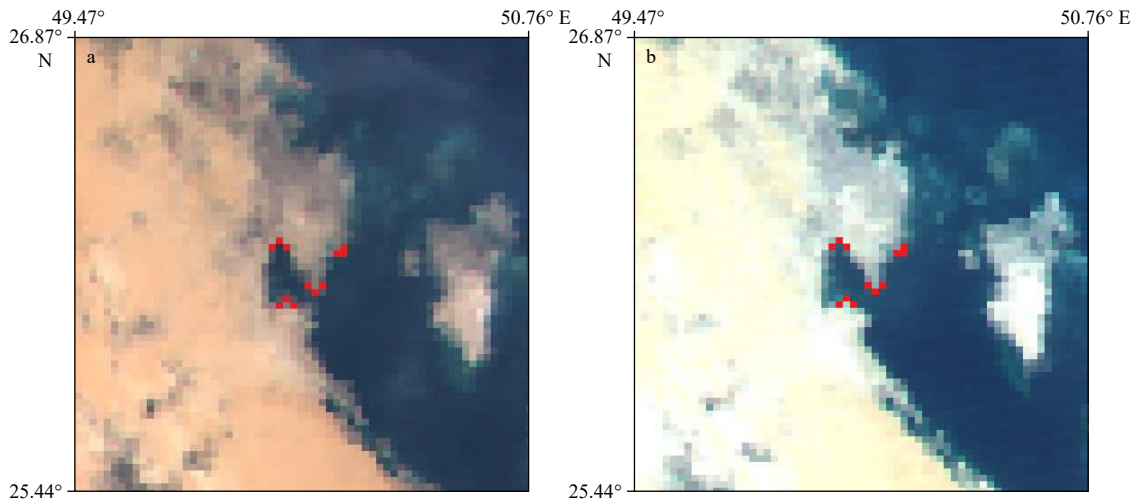


图 10 HY-1C 卫星(a)与 HY-1D 卫星(b)对应特征点采样

Fig. 10 Corresponding feature points sampled from HY-1C satellite (a) and HY-1D satellite (b)

表 3 HY-1C/D 卫星特征区域采样点比较

Table 3 Sampling points comparison of HY-1C/D satellite feature areas

HY-1C卫星		HY-1D卫星		偏差/像元	
行号	列号	行号	列号	纬度方向	经度方向
6 389	23 013	6 389	23 013	0	0
6 390	23 014	6 390	23 014	0	0
6 389	23 015	6 389	23 015	0	0
6 384	23 017	6 384	23 017	0	0
6 384	23 018	6 384	23 018	0	0
6 383	23 018	6 383	23 018	0	0
6 392	23 009	6 392	23 009	0	0
6 391	23 010	6 391	23 010	0	0
6 392	23 011	6 392	23 011	0	0
6 383	23 008	6 383	23 008	0	0
6 382	23 009	6 382	23 009	0	0
6 383	23 010	6 383	23 010	0	0
平均偏差/像元				0	0

5 像元尺度效应对几何定位误差影响分析

COCTS 几何定位方法的地理定位结果存在误差,本节分析像元尺度效应对几何定位误差的影响。地球是个不规则的三维椭球体,两极略尖,赤道略鼓,从而半轨成像具有两极宽、赤道窄的特点。选取 COCTS 在 2020 年 10 月 27 日扫描覆盖阿拉伯半岛的半轨经纬度数据,对于 1 664 列数据,从中选择 7 对相邻样本列,分别是 1 和 2 列、208 和 209 列、416 和 417 列、832 和 833 列、1247 和 1248 列、1454 和 1455 列、1 663 和 1 664 列。为了详细分析半轨经纬度数据,把半轨扫描区域分成 3 部分:靠近北极的前 1/3 区域、中间 1/3 区域、靠近南极的后 1/3 区域。分别计算各区域每对样本列的平均距离,记录如表 4。根据表 4 中数据作 7 对样本列距离变化趋势图,便于直观看出经纬度数据的特征趋势,如图 11 所示,黑色、绿色、蓝色虚线分别表示前 1/3 区域、中间 1/3 区域、后 1/3 区域,红色实线表示半轨区域,同时用柱形图表示该半轨区域的 7 对样本列距离。结合水色仪 COCTS 的扫描原理,分析表 4 数据和图 11 的变化趋势,可以得出,从星下点到两侧边缘,从赤道到两极,采样像元

表 4 相邻样本列距离 (单位: (°))
Table 4 Distance of adjacent sample arrays (unit: (°))

区域	样本对						
	1/2	208/209	416/417	832/833	1 247/1 248	1 454/1 455	1 663/1 664
前1/3区域	0.180 6	0.109 5	0.035 5	0.018 2	0.020 6	0.030 5	0.084 8
中间1/3区域	0.068 3	0.020 6	0.012 4	0.008 9	0.012 4	0.020 5	0.068 6
后1/3区域	0.091 1	0.031 7	0.021 3	0.019 0	0.038 0	0.131 9	0.185 6
半轨区域	0.123 3	0.066 9	0.025 0	0.016 0	0.025 9	0.079 0	0.124 3

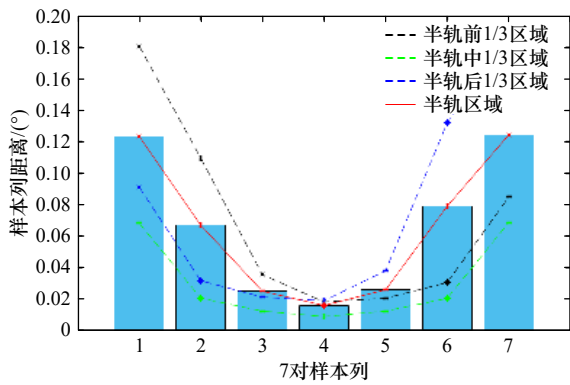


图 11 7 对样本列距离变化趋势

Fig. 11 Distance change trends of seven pairs of adjacent sample arrays

尺度呈增大趋势。

半轨扫描区域如图 12a 中黑色线框范围, 为了具体分析两侧和星下点附近中间区域的误差特征, 从两侧和中间区域各选取 40 个海岸特征点, 分别用红色、黄色标志, 进一步放大如图 12b 所示。两侧和中间区域的特征点在 1 km 分辨率遥感图中的行列号以及与 GSHHG 数据库海岸线坐标的像元误差分别记录在表 5 和表 6 中, 经误差统计, 两侧区域的纬度方向、经

度方向平均误差分别是 0.95、1.25 个像元, 即误差为 1.57 个像元; 中间区域的纬度方向、经度方向平均误差分别是 0.30、0.65 个像元, 即误差为 0.72 个像元, 所以扫描区域两侧的几何定位误差比中间大。理论分析结合实际结果验证可知, 星下点误差最小, 越接近两侧边缘, 采样像元畸变越大, 定位误差随之增大。因此, 从星下点到两侧边缘, 定位误差随采样像元尺度增大而呈增大趋势, 二者呈正相关。

为了具体分析从赤道到两极的误差特征, 在扫描范围内的赤道附近区域和南北纬 35°附近区域分别选取 20 个海岸特征点, 并且特征点都分布在星下点附近区域, 如图 13a 所示, 进一步放大如图 13b 所示。赤道附近、35°N 附近和 35°S 附近的特征点在遥感图中的行列号, 以及特征点与 GSHHG 数据库海岸线坐标的像元误差分别记录在表 7、表 8、表 9 中, 经误差统计, 赤道附近特征点的纬度方向、经度方向平均误差分别是 0.20、0.40 个像元, 即误差为 0.45 个像元; 35°N 附近特征点的纬度方向、经度方向平均误差分别是 0.55、0.80 个像元, 即误差为 0.97 个像元; 35°S 附近特征点的纬度方向、经度方向平均误差分别是 0.50、0.70 个像元, 即误差为 0.86 个像元, 因此扫描区

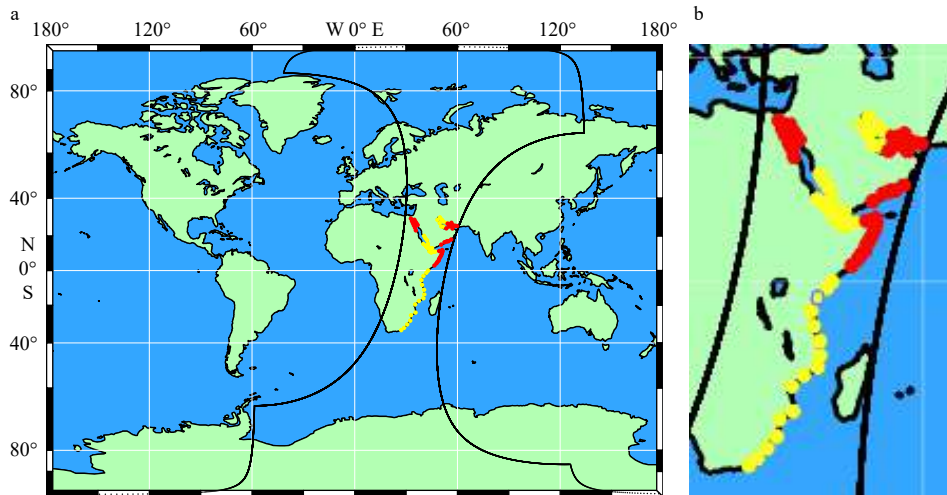


图 12 中间及两侧边缘特征点采样(a)及放大(b)

Fig. 12 Feature points sampled in the middle and marginal sides (a) and enlargement (b)

表 5 靠近边缘两侧区域特征点误差

Table 5 Errors of feature points on both edge-nearing sides of the track

序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差	序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差
1	6 393	21 569	1	2	21	7 360	23 244	2	2
2	6 548	21 524	1	2	22	7 496	23 049	1	1
3	6 424	21 460	0	1	23	7 861	22 933	2	0
4	6 308	21 404	0	1	24	7 805	23 105	0	1
5	6 189	21 345	2	2	25	7 909	23 117	1	2
6	6 049	21 281	2	1	26	8 028	23 088	2	1
7	6 177	21 449	0	1	27	8 128	23 041	1	1
8	6 116	21 488	1	2	28	8 224	22 985	0	1
9	6 229	21 413	1	2	29	8 316	22 929	1	2
10	6 397	21 673	0	1	30	8 412	22 909	0	3
11	6 325	23 428	1	1	31	8 492	22 833	2	0
12	6 280	23 649	2	0	32	8 704	22 656	1	1
13	6 409	23 736	0	2	33	8 577	22 773	2	2
14	6 453	23 973	1	0	34	7 844	23 120	0	1
15	6 581	23 352	2	1	35	6 304	21 604	0	1
16	6 477	23 529	0	2	36	6 229	21 553	1	1
17	6 425	23 633	0	2	37	6 345	23 488	1	0
18	6 589	23 709	2	1	38	6 437	23 857	1	0
19	7 205	23 632	1	0	39	7 297	23 480	1	2
20	7 297	23 413	1	3	40	7 317	23 365	1	1
平均误差/像元								0.95	1.25

表 6 中间区域特征点误差

Table 6 Errors of feature points in the middle area of the track

序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差	序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差
1	6 293	23 353	1	2	21	7 648	22 328	0	1
2	6 212	23 184	0	0	22	7 721	22 360	1	1
3	6 109	23 088	0	0	23	7 732	22 433	1	0
4	5 985	22 976	0	0	24	7 696	22 521	0	0
5	6 117	22 832	1	1	25	7 897	22 708	0	1
6	6 292	22 965	0	0	26	7 909	22 596	0	0
7	6 477	23 057	0	1	27	7 953	22 473	1	1
8	6 489	23 164	0	2	28	7 881	22 360	0	1
9	7 676	22 240	0	0	29	11 408	21 552	0	1
10	7 601	22 180	0	1	30	11 552	21 289	1	0
11	7 553	22 137	2	0	31	11 849	21 241	0	1

续表 6

序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差	序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差
12	7 460	22 008	0	0	32	12 049	21 064	0	1
13	7 000	22 052	1	1	33	12 232	20 881	0	1
14	7 124	22 121	0	0	34	12 351	20 713	1	0
15	7 244	22 221	0	1	35	10 757	21 749	0	2
16	7 445	22 276	0	1	36	10 385	22 064	0	0
17	9 001	22 288	0	1	37	10 117	22 052	0	1
18	9 129	22 181	0	0	38	9 836	21 932	0	0
19	10 605	22 012	1	1	39	9 312	22 013	1	0
20	10 953	21 528	0	2	40	9 553	21 896	0	1
平均误差/像元								0.30	0.65

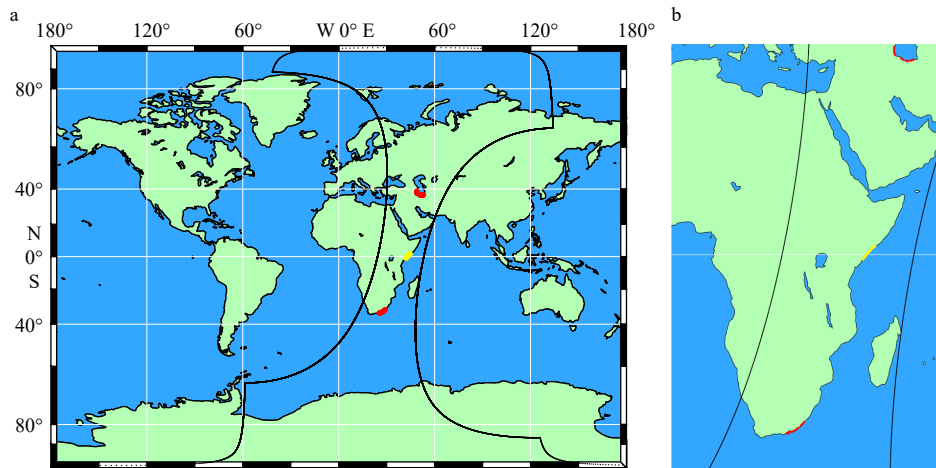


图 13 赤道及两侧特征点采样(a)及放大(b)

Fig. 13 Feature points sampled near the equator and its both sides (a) and enlargement (b)

表 7 赤道附近特征点误差

Table 7 Errors of feature points near the equator

序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差	序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差
1	8 832	22 472	1	1	11	8 968	22 317	0	0
2	8 844	22 453	0	2	12	8 984	22 304	0	0
3	8 856	22 440	0	0	13	8 996	22 293	0	1
4	8 872	22 421	0	0	14	9 008	22 281	0	0
5	8 892	22 397	1	0	15	9 017	22 272	0	0
6	8 904	22 384	0	1	16	9 032	22 257	0	0
7	8 917	22 365	0	0	17	9 048	22 241	1	1
8	8 929	22 353	0	0	18	9 065	22 228	1	0
9	8 944	22 340	0	0	19	9 080	22 217	0	1
10	8 957	22 325	0	1	20	9 093	22 204	0	0
平均误差/像元								0.20	0.40

表 8 35°N 附近特征点误差

Table 8 Errors of feature points near 35°N

序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差	序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差
1	5 317	23 312	0	0	11	5 288	23 036	0	0
2	5 324	23 292	0	1	12	5 240	22 917	1	1
3	5 328	23 272	0	1	13	5 229	22 904	1	0
4	5 333	23 252	2	1	14	5 216	22 897	0	2
5	5 341	23 200	1	0	15	5 196	22 892	0	0
6	5 340	23 176	0	0	16	5 181	22 889	1	0
7	5 333	23 152	1	2	17	5 160	22 888	0	3
8	5 320	23 093	1	1	18	5 145	22 888	2	1
9	5 312	23 077	1	0	19	5 121	22 885	0	0
10	5 297	23 049	0	1	20	5 105	22 893	0	1
平均误差/像元								0.55	0.80

表 9 35°S 附近特征点误差

Table 9 Errors of feature points near 35°S

序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差	序号	行号	列号	纬度方向像元误差	经度方向像元误差
1	12 397	20 529	0	2	11	12 356	20 697	1	1
2	12 404	20 552	1	0	12	12 344	20 724	0	3
3	12 401	20 572	1	2	13	12 333	20 741	0	0
4	12 389	20 564	0	0	14	12 317	20 765	1	0
5	12 381	20 568	0	1	15	12 300	20 793	0	1
6	12 369	20 585	0	0	16	12 268	20 840	1	1
7	12 369	20 604	0	0	17	12 252	20 860	0	0
8	12 373	20 629	1	0	18	12 236	20 877	0	1
9	12 373	20 656	0	1	19	12 221	20 896	0	0
10	12 364	20 676	2	0	20	12 197	20 916	2	1
平均误差/像元								0.50	0.70

域赤道附近定位误差比两侧小。理论分析结合实际结果验证可知,赤道定位误差最小,越靠近两极,采样像元畸变越大,定位误差随之增大。因此,从赤道到两极,定位误差随采样像元尺度增大而逐渐增大,二者呈正相关。

6 结论

HY-1C/D 卫星水色仪 COCTS 几何定位方法是遥感资料预处理系统的重要组成部分,精确的地理定位数据即 1 级产品可以提高 HY-1C/D 卫星后续产品的质量,因此建立一套将水色仪 0 级产品处理成 1 级产

品的系统,包括数据解包、几何定位,显得尤为重要。本文几何定位方法取代了传统需要根据 6 个轨道参数来计算卫星位置的方法,也简化了传统 ORB 到 ECR 的复杂转换过程,在卫星星历中采用插值法获得采样时间对应的卫星位置和速度,进而直接计算 ORB 到 ECR 的转换矩阵。基于 COCTS 逐点摆动、四元并扫的扫描方式以及相关参数,计算采样点 ORB 视矢量,建立采样点视矢量与地球交叉点关系模型,从而对 COCTS 采样像元进行地理定位。通过对 HY-1C/D 卫星水色仪 COCTS 几何定位结果的验证与分析,得出以下结论:

(1) 针对海岸线定性验证, COCTS 与 MODIS 遥感图海岸线匹配一致, 二者变化趋势吻合。

(2) 针对海岸线定量验证, COCTS 几何定位方法计算的海岸线经纬度与 GSHHG 参考海岸线坐标相比, 误差在 2 个像元内, 即 2 km 内。

(3) 针对星下点定量验证, 星下点坐标计算值与 STK 生成的参考值相比, 误差在 2 个像元内且从赤道至两极, 星下点误差呈递增趋势。

(4) COCTS 几何定位方法对 HY-1D 卫星与 HY-

1C 卫星 COCTS 的定位结果一致。

(5) 像元尺度效应与几何定位误差呈正相关。从星下点到两侧边缘, 定位误差随采样像元尺度增大而呈增大趋势, 星下点误差最小; 从赤道到两极, 定位误差也随采样像元尺度增大而逐渐增大, 赤道定位误差最小。

综上所述, 经过定性、定量验证与分析, 以卫星轨道参数和水色仪 COCTS 参数为基础的几何定位方法是可行的, 满足一定的定位精度要求, 可以用于 COCTS 遥感图像预处理的几何定位。

参考文献:

- [1] 曾丽萍, 王振松. 一种新的MODIS 0级数据地理定位方法[J]. *现代电子技术*, 2008, 31(2): 173-174.
Zeng Liping, Wang Zhensong. A new MODIS 0 level earth location algorithm[J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, 31(2): 173-174.
- [2] Nishihama M, Wolfe R, Solomon D, et al. MODIS level 1A earth location: algorithm theoretical basis document version 3.0[EB/OL]. (1997-08-26) [2021-04-15]. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod28_v3.pdf.
- [3] 孙从容. 中国海洋一号卫星遥感图像GPS地理定位算法研究与实现[J]. *航天器工程*, 2003, 12(3): 144-150.
Sun Congrong. Research and implementation of GPS geolocation algorithm for China HY-1 satellite remote sensing image[J]. *Spacecraft Engineering*, 2003, 12(3): 144-150.
- [4] 关敏, 杨忠东. FY-3微波成像仪遥感图像地理定位方法研究[J]. *遥感学报*, 2009, 13(3): 469-474.
Guan Min, Yang Zhongdong. Geolocation method for FY-3 MWRI's remote sensing image[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(3): 469-474.
- [5] Baker N. Joint Polar Satellite System VIIRS Geolocation Algorithm Theoretical Basis Document[R/OL]. (2011-06-31) [2021-04-15]. https://lpdaac.usgs.gov/documents/135/VNP03_ATBD.pdf
- [6] 潘德炉, 毛天明, 李淑菁. 海洋卫星资料的地理定位及相关几何参数算法研究[J]. *海洋学报*, 1997, 19(5): 56-68.
Pan Delu, Mao Tianming, Li Shujing. Research on geolocation of marine satellite data and related geometric parameter algorithms[J]. *Haiyang Xuebao*, 1997, 19(5): 56-68.
- [7] 柴毅. 基于多传感器的卫星在轨高精度姿态确定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
Chai Yi. Research on high accuracy attitude determination methods for on-orbit satellite based on multiple sensors[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [8] 边少锋, 纪兵, 李厚朴. 卫星导航系统概论[M]. 2版. 北京: 测绘出版社, 2016.
Bian Shaofeng, Ji Bing, Li Houpu. Introduction to Satellite Navigation Systems[M]. 2nd ed. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2016.
- [9] 关敏, 谷松岩, 杨忠东. 风云三号微波湿度计遥感图像地理定位方法[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(6): 712-716.
Guan Min, Gu Songyan, Yang Zhongdong. Geolocation method for FY-3 MWSH's remote sensing image[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(6): 712-716.
- [10] 窦长勇, 岳昔娟. 轨道坐标系到地心固定坐标系的直接转换方法[J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(5): 86-94.
Dou Changyong, Yue Xijuan. Direct transformation from orbital to earth-centered earth-fixed reference frame[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(5): 86-94.
- [11] Noredlinger P D, Klein L. Theoretical basis of the SDP toolkit geolocation package for the ECS project. Landover: Hughes Applied Information Systems[R/OL]. (1995-05-18) [2021-04-15]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.131.7265&rep=rep1&type=pdf>.
- [12] 杨磊, 杨忠东, 张里阳, 等. 极轨气象卫星有效载荷航空校飞数据地理定位[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(30): 202-205.
Yang Lei, Yang Zhongdong, Zhang Liyang, et al. Geolocation of airborne data for polar meteorological satellite payloads[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(30): 202-205.
- [13] 熊显名, 尧雪娟, 滕惠忠, 等. 基于遥感图像光谱特征的水陆分界线提取[C]//2007'仪表, 自动化及先进集成技术大会论文集. 重庆: 《仪器仪表学报》杂志社, 2007.
Xiong Xianming, Yao Xuejuan, Teng Huizhong, et al. Shoreline extract based on spectral signatures of remote sensing images[C]//2007' Instrumentation, Automation and Advanced Integration Technology Conference. Chongqing: Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007.
- [14] Lykhovyd P V. Forecasting oil crops yields on the regional scale using normalized difference vegetation index[J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(3): 53-57.
- [15] 李继红, 焦裕欣. 东北地区归一化植被指数与环境因子间的尺度依存关系[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(2): 70-77.
Li Jihong, Jiao Yuxin. Dependence between NDVI and environmental factors in northeast China[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(2): 70-77.

- [16] 黄慧,董林鹭,何建华,等.强噪声下改进Canny算法的边缘检测[J].*计算机技术与发展*,2021,31(1):83-87.
Huang Hui, Dong Linlu, He Jianhua, et al. Edge detection of an improved canny algorithm under strong noise[J]. *Computer Technology and Development*, 2021, 31(1): 83-87.
- [17] Loderer M, Beitelshmidt M. Improved edge detection based on fractional derivatives for real-time measurement systems[J]. *PAMM*, 2019, 19(1): e201900439.
- [18] Howard M, Hock M C, Meehan B T, et al. A locally adapting technique for edge detection using image segmentation[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2018, 40(4): B1161-B1179.
- [19] 黄祥李,张杰,计科峰,等.基于GSHHG数据库与改进CV模型的SAR图像海陆分割算法[C]//第五届高分辨率对地观测学术年会论文集.西安:中国科学院高分重大专项管理办公室,2018.
Huang Xiangli, Zhang Jie, Ji Kefeng, et al. Sea-land segmentation algorithm of SAR image based on GSHHG database and improved CV model[C]//The Fifth Annual Conference on High Resolution Earth Observation, Xi'an: High Score Major Project Management Office of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [20] 王存良.对地面某区域某时段连续覆盖的卫星轨道计算[J].*信息与电子工程*,2012,10(4):421-425.
Wang Cunliang. Calculation of the satellite orbit covering certain area on the ground in some period of time[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2012, 10(4): 421-425.
- [21] 李跃跃,胡彩波,孙江艳,等.基于STK/Matlab的导航星座性能分析[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集——S08 测试评估技术.哈尔滨:中科北斗汇(北京)科技有限公司,2018.
Li Yueyue, Hu Caibo, Sun Jiangyan, et al. Performance analysis of navigation constellation based on STK/Matlab[C]//The Ninth China Satellite Navigation Conference. Harbin: Zhongke Beidouhui (Beijing) Technology Co., Ltd, 2018.

Geometric positioning method of HY-1C/D satellite Chinese ocean color and temperature scanner

Liu Jianyang¹, Mao Zhihua^{1,2}, Tao Bangyi², Ma Li², Zhu Qiankun²,
Huang Haiqing², Liu Jianqiang³, Ding Jing³

(1. School of Oceanography, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Marine Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 3. National Satellite Ocean Application Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Chinese Ocean Color Temperature Scanner (COCTS) of Haiyang 1C/D (HY-1C/D) satellite is mainly used to detect ocean water color, water temperature and other elements. These elements can only be achieved by processing satellite data, and geometric positioning is the core of preprocessing, which directly affects quality of these elements. COCTS has the characteristics of 114° field of view and quaternary whisk broom point by point. A set of complete geometric positioning method has been developed based on COCTS characteristics. The satellite position and velocity corresponding to the sampling time are obtained by using the interpolation method in the satellite ephemeris extracted from 0 level data, and then the transformation matrix from orbital coordinate system (ORB) to earth-centered rotating coordinate system (ECR) will be achieved. Based on the quaternary whisk broom point by point, the ORB viewing vector of every sampling point in a sweep can be calculated by rotating center viewing vector around X and Y axis in corresponding angles. The relationship model of viewing vector and the earth intersection point can be established to carry out geolocation of remote sensing images obtained from band data. This article uses interpolation to replace the traditional complex method that requires 6 orbital elements to calculate the satellite position, and directly calculates ORB to ECR transformation matrix rather than the traditional two-step transformation method. After multiple sets of data calculation and qualitative and quantitative verification, the HY-1C/D COCTS geometric positioning results are consistent. As a result of the sampling pixel scale effect, the error increases gradually from Nadir to the edge of two sides and from the equator to two poles, all within the error of 2 pixels. This method meets certain positioning accuracy requirements and can be employed for geometric positioning of COCTS.

Key words: HY-1C/D satellite; COCTS; geometric positioning; whisk broom point by point