



引文格式:王阳阳,王中元,胡超,等.优化历元间载波相位差分的车辆姿态估计模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(8):1359-1365.DOI:10.13203/j.whugis.20200571

Citation: WANG Yangyang, WANG Zhongyuan, HU Chao, et al. Vehicle Attitude Estimation Model Using Optimized Time-Differenced Carrier Phase[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1359-1365. DOI: 10.13203/j.whugis.20200571

# 优化历元间载波相位差分的车辆姿态估计模型

王阳阳<sup>1</sup> 王中元<sup>1</sup> 胡超<sup>2</sup> 余志浩<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州, 221116

<sup>2</sup> 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南, 232001

**摘要:**针对运动车辆的姿态角传统估计方法成本较高、模型复杂等问题,提出一种低成本、高效率、高精度的基于载波相位时间差分(time-differenced carrier phase, TDCP)的车辆航向角和俯仰角估计模型。该模型利用一台全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机的观测数据,使用复杂度低的TDCP算法得到精确的车辆位移矢量,进而估计车辆航向角和俯仰角;为了提高估计效率,对传统载波相位时间差分算法进行了优化。基于中国香港连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)数据的静态实验和基于车载数据的动态实验结果表明,优化的载波相位时间差分较一般载波相位时间差分效率更高,所提出的航向角和俯仰角估计模型能提供精确的航向角和俯仰角估计值,其均方根误差小于 $0.2^\circ$ ,最大误差小于 $1.5^\circ$ 。

**关键词:**航向角;俯仰角;载波相位时间差分;车辆姿态估计

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2021-10-28

DOI: 10.13203/j.whugis.20200571

文章编号:1671-8860(2023)08-1359-07

## Vehicle Attitude Estimation Model Using Optimized Time-Differenced Carrier Phase

WANG Yangyang<sup>1</sup> WANG Zhongyuan<sup>1</sup> HU Chao<sup>2</sup> YU Zhihao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

<sup>2</sup> School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

**Abstract: Objectives:** To solve the problems of high cost and high complexity of traditional estimation method of the moving vehicles attitude angle, an innovative vehicle heading and pitch estimation model based on optimized time-differenced carrier phase is proposed. **Methods:** First, we use observation data of one global navigation satellite system receiver and time-differenced carrier phase algorithm with a low-complexity to obtain accurate vehicle displacement vector, further estimate vehicle heading and pitch. In order to improve the estimation efficiency, we optimize the traditional time-differenced carrier phase algorithm. **Results:** Static and dynamic tests results show that the optimized time-differenced carrier phase is more efficient than the general carrier phase time-difference, and the processing time can be saved by about 40%. The proposed heading and pitch estimation model can provide accurate values of heading and pitch, whose root mean square error is less than  $0.2^\circ$  and maximum error is less than  $1.5^\circ$ . The accuracy of the model will not be affected by the accumulation of errors within one hour. **Conclusions:** This proposed model uses only one receiver to obtain heading and pitch of moving vehicles, which has the advantages of high accuracy, low cost, low complexity and high efficiency.

**Key words:** heading; pitch; time-differenced carrier phase; vehicle attitude estimation

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFB0502102);江苏省自然科学基金(BK20181361);天津市自然科学基金(20JCZDJC00390)。

**第一作者:**王阳阳,硕士,主要从事GNSS精密定位研究。wang2yang1998@163.com

**通讯作者:**王中元,博士,副教授。wzy@cumt.edu.cn

姿态是地面运动车辆最重要的信息之一,姿态估计问题也是车辆导航、无人驾驶等领域研究的热点问题<sup>[1-3]</sup>。车辆姿态估计问题的最终目标是获得车辆的六维空间描述:三维(three-dimensional, 3D)坐标和3D空间姿态角<sup>[4]</sup>。通过全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)及惯性导航系统可得到车辆的3D坐标。目前,车辆的姿态信息估计方法可以分为视觉方法姿态估计以及利用传感器的姿态估计。视觉方法估计姿态成本较低,但是计算量大,其精度难以保证,而且不能对同一车辆进行长时间跟踪估计;利用传感器进行姿态持续跟踪估计在目前车辆姿态估计中应用最为广泛。许多传感器可用于确定车辆部分或全部姿态,包括惯性测量装置(inertial measurement unit, IMU)、磁力仪、数字罗盘、陀螺仪、GNSS接收机以及各种传感器的组合<sup>[5-6]</sup>。其中,GNSS接收机进行车辆航向角和俯仰角估计具有成本低、精度高的优点。GPS(global positioning system)天线接收到的载波相位观测值可解算得到平台的姿态,众多学者及公司开展使用GNSS接收机进行姿态估计的研究并投入生产,如美国Ashtech公司、Trimble公司等<sup>[7-8]</sup>。文献[5]对这种多接收机GNSS姿态估计方案及其与其他确定姿态传感器的集成进行了综述。虽然利用两个或更多GNSS接收机的解决方案对姿态确定是有效的,但与单天线GNSS相比,两个或更多GNSS接收机增加了成本和复杂性。此外,如果使用短基线,干涉测量的GNSS数据噪声比较大。为解决多天线姿态确定的缺点,有研究提出基于单天线的车辆姿态估计<sup>[9-10]</sup>。

单接收机进行姿态估计的一般方法是通过GNSS多普勒或者载波相位观测值得到车辆的位移或速度,通过位移或者速度矢量的方向来确定车辆的俯仰角和航向角。由于单个GNSS接收机只能得到俯仰角和航向角,并且存在输出频率低及时延问题,通常会使用磁力计等传感器来辅助GNSS接收机进行定姿<sup>[10-11]</sup>。文献[7]使用GNSS观测值时间差分方法设计了一种俯仰角和航向角估计的工具iTAG\_VAD,该工具可以使用伪距观测值或者载波相位观测值进行航向角和俯仰角的实时估计,且均方根误差均小于1°。经研究发现,iTAG\_VAD工具存在不足之处,其中之一是在历元 $t$ 处的速度估计要求接收机位置在历元 $t$ 和 $t+1$ 是已知的,这会增加模型的计算量,降低模

型效率。

对于运动车辆的姿态角,传统估计方法成本较高、模型复杂,针对此问题,本文提出一种低成本、低复杂度、高效率、高精度的车辆航向角和俯仰角估计模型。其中,为提高估计效率,该模型对传统载波相位时间差分(time-differenced carrier phase, TDCP)算法进行了优化。该模型分为3个部分:(1)数据获取及预处理;(2)使用优化的TDCP算法估计精确的车辆位移矢量;(3)通过位移矢量求解航向角和俯仰角。

## 1 坐标系及姿态角定义

由GNSS观测值最初得到的坐标位于地心地固(earth-centered earth-fixed, ECEF)坐标系,该坐标系的原点在地球质量的中心,并随着地球一起转动,定义为 $(X, Y, Z)$ <sup>[12]</sup>。ECEF坐标系下的坐标通常表示为纬度( $\varphi$ )、经度( $\lambda$ )、椭球高度( $h$ )。在现实生活中,运动车辆的姿态角一般定义为站心坐标系(east-north-up, ENU)下的姿态角。站心坐标系定义 $x$ 轴指向站心的东方向, $y$ 轴指向站心的北方向, $z$ 轴垂直于站点位置的水准面。两个坐标系如图1所示。

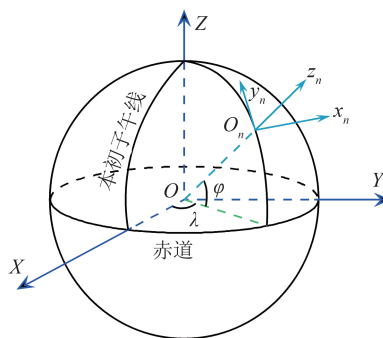


图1 ECEF坐标系和站心坐标系

Fig. 1 ECEF Coordinate System and ENU Coordinate System

车身中心线向前的运动方向定义为 $y$ 轴,它位于汽车运动的平面上; $x$ 轴垂直于车体中心线,在汽车运动的平面上指向原点的右边; $z$ 轴向上,垂直于汽车运动平面。运动车辆的姿态通常用航向角、俯仰角和翻转角来表示,航向角定义为车辆运动方向与本初子午线的夹角,其值为 $0^\circ \sim 360^\circ$ ;俯仰角定义为车辆运动方向与本地水准面的夹角,其值为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。3个姿态角定义为车身坐标系相对于站心坐标系的旋转角度,如图2所示。

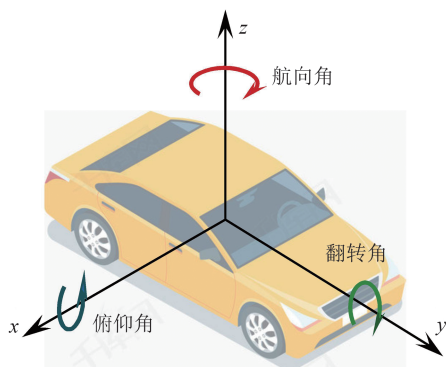


图 2 车身坐标系及姿态角

Fig. 2 Vehicle Body Coordinate System and Attitude Angle

## 2 GNSS TDCP 车辆航向角和俯仰角估计模型

### 2.1 TDCP 估计位移矢量

GNSS TDCP 是对历元间的载波相位进行差分,通过计算得到历元间接收机的准确位移的技术,所得位移的精度可以达到毫米级,被广泛应用于各种精度要求比较高的领域<sup>[13-17]</sup>。GNSS 载波相位测量的原始方程为:

$$\lambda\Phi_r^s(t) = \rho_r^s(t) - (\delta t_r - \delta t^s)c - \lambda N^s(t) - \delta_{\text{ion}}(t) + \delta_{\text{trop}}(t) + \epsilon(t) \quad (1)$$

式中,  $t$  表示历元;  $\lambda$  表示载波波长;  $\Phi$  为以周为单位的载波相位观测值;  $\rho$  是卫星与接收机之间的几何距离;  $\delta t_r$  是接收机时钟误差;  $\delta t^s$  是卫星时钟误差;  $\delta_{\text{ion}}$  是电离层延时;  $\delta_{\text{trop}}$  是对流层延时;  $N$  为整周模糊度;  $\epsilon$  为其余误差;  $c$  为光速。在不考虑周跳的情况下,对相邻历元的载波相位观测值差分可得到:

$$\lambda\Delta\Phi_r^s = \Delta\rho_r^s - c\Delta\delta t_r + c\Delta\delta t^s - \Delta\delta_{\text{ion}} + \Delta\delta_{\text{trop}} \quad (2)$$

式中,  $\Delta$  表示历元间差分算子;  $\Delta\rho_r^s$  为两相邻时刻卫星与接收机几何距离变化量;  $\Delta\delta t_r$  为接收机钟差变化量;  $\Delta\delta t^s$  为卫星钟差变化量;  $\Delta\delta_{\text{ion}}$  为电离层延时变化量;  $\Delta\delta_{\text{trop}}$  为对流层延时变化量。由于电离层以及对流层等大气延时变化缓慢,所以在间隔较短的相邻历元  $\Delta\delta_{\text{ion}}$  和  $\Delta\delta_{\text{trop}}$  趋近于 0,即通过时间差分方式可以基本消除电离层延时与对流层延时等误差项。另外,时间差分可以消除整周模糊度。忽略微小误差后,差分方程可以表示为:

$$\lambda\Delta\Phi_r^s = \Delta\rho_r^s - c\Delta\delta t_r \quad (3)$$

接收机到卫星的几何距离可以表示为:

$$\rho_r^s(t) = e(t) \cdot (R^s(t) - R_r(t)) \quad (4)$$

式中,  $R^s(t)$  表示卫星坐标矢量;  $R_r(t)$  表示接收机

坐标矢量;  $e(t)$  表示该历元接收机到卫星方向的单位向量,可通过  $e(t_i) = \frac{R^s(t_i) - R_r(t_i)}{\|R^s(t_i) - R_r(t_i)\|}$  得到。

通过对相邻历元的卫星几何距离差分,加上条件  $R_r(t) = R_r(t-1) + \Delta r$  及式(3)可以得到:

$$\lambda\Delta\Phi_r^s - D + G = -e(t_2) \cdot \Delta r - c\Delta\delta t_r \quad (5)$$

$$\begin{cases} D = e(t_2) \cdot R_s(t_2) - e(t_1) \cdot R_s(t_1) \\ G = e(t_2) \cdot R_r(t_1) - e(t_1) \cdot R_r(t_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\Delta r = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$  表示相邻历元接收机的位移矢量。在可观测卫星数大于 4 的情况下,通过式(5)即可实现 TDCP 测定接收机在单位时间间隔内的位移矢量。

### 2.2 优化的位移矢量估算方法

基于§2.1 分析可知,在传统 TDCP 估计当前相邻历元位移矢量时,要求该相邻两个历元接收机的坐标已知,接收机的坐标需要通过标准单点定位计算得到,算法效率有待提高。本文选择使用一种优化 TDCP 算法,该算法通过线性化等方法,不需要对每个历元进行标准单点定位,从而简化了计算。

将不存在周跳情况下,  $t_2$  和  $t_1$  连续两个 GPS 历元的测量值进行差分,在高采样频率下,对流层延迟、电离层延迟、多径影响的变化可以忽略,得到:

$$\lambda\Delta\Phi_r^s = \rho_r^s(t_2) - \rho_r^s(t_1) + c\Delta\delta t_r \quad (7)$$

式中,任一历元的星地距离  $\rho_r^s$  可表示为:

$$\rho_r^s = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2} \quad (8)$$

而  $\rho_r^s(t_2)$  可以在  $t_1$  时刻坐标  $P_0 = (x_r, y_r, z_r)|_{t_1}$  处进行泰勒展开,省略二次以上展开项,得到:

$$\begin{aligned} \rho_r^s(t_2) = & \rho_{r_0}^s(t_2) + \left. \frac{\partial \rho_r^s(t_2)}{\partial x_r(t_2)} \right|_{P_0} \cdot \Delta x_r(t_2) + \\ & \left. \frac{\partial \rho_r^s(t_2)}{\partial y_r(t_2)} \right|_{P_0} \cdot \Delta y_r(t_2) + \left. \frac{\partial \rho_r^s(t_2)}{\partial z_r(t_2)} \right|_{P_0} \cdot \Delta z_r(t_2) \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\rho_{r_0}^s(t_1)$  表示  $t_1$  历元接收机位置到  $t_2$  历元卫星位置的距离,即把接收机上一历元接收机的位置当作下一历元接收机的先验位置。将式(8)和式(9)代入式(7),可以得到:

$$\lambda\Delta\Phi_r^s = -\hat{H}_r^s(t_2) \cdot \Delta r + [\rho_{r_0}^s(t_1) - \rho_r^s(t_1)] + c\Delta\delta t_r \quad (10)$$

$$\hat{H}_r^s(t_2) = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial \rho_r^s(t_2)}{\partial x_r(t_2)} \right|_{P_0} & \left. \frac{\partial \rho_r^s(t_2)}{\partial y_r(t_2)} \right|_{P_0} & \left. \frac{\partial \rho_r^s(t_2)}{\partial z_r(t_2)} \right|_{P_0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $\hat{H}_r^s(t_2)$  表示从  $t_2$  历元先验的接收机位置指向卫星位置的单位方向矢量。

通过式(10)迭代计算可以解得  $\Delta \mathbf{r}$ , 即接收机在历元间的位移矢量。理论上, 应该通过迭代来提高精度, 但是实验证明, 没有必要进行迭代<sup>[18]</sup>。

### 2.3 车辆航向角及俯仰角估计

车辆姿态角理论上是以速度矢量为基础的。车辆在道路上运动时, 其姿态角取决于轨迹曲线的切线方向, 即车辆速度方向。但是, 考虑道路几何形状和车辆运动限制, 在短时间间隔内, 可以用历史轨迹曲线的割线来代替切线作为速度方向(见图3), 即可通过式(9)得到的  $\Delta \mathbf{r}$  估计车辆航向角和俯仰角。

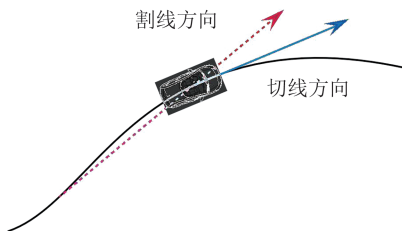


图3 切线方向和割线方向

Fig. 3 Tangent Direction and Secant Direction

站心坐标系中姿态角与位移矢量  $\Delta \mathbf{r} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$  的关系如图4所示。航向角  $H$ 、俯仰角  $P$  和位移矢量  $\Delta \mathbf{r}$  的数学关系如下:

$$H = \begin{cases} \cos^{-1}(\Delta y / \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}), \Delta x \geq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\Delta y / \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}), \Delta x < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$P = \tan^{-1}(\Delta z / \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}) \quad (13)$$

式中,  $H \in [0, 2\pi)$ ;  $P \in (-\pi/2, \pi/2)$ 。

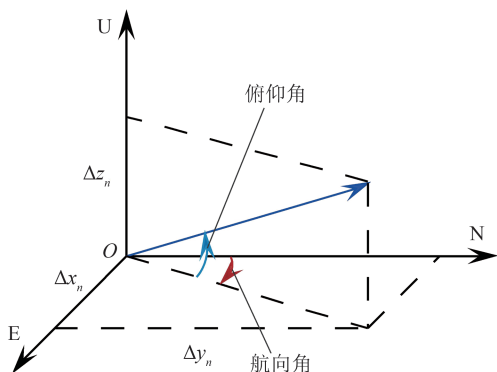


图4 位移矢量与航向角和俯仰角

Fig. 4 Displacement Vector and Heading, Pitch

## 3 实验分析

本文设计静态和动态两组实验, 静态实验验证优化 TDCP 算法的效率和精度, 动态实验验证姿态角估计模型的效率、精度和可行性。

### 3.1 静态实验

选取中国香港连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)锦田站(HK-KT)2020-05-01T02:00:00—03:00:00的GPS观测数据, 采样频率为1 Hz。实验时, 卫星高度角设置为10°, 使用无电离层组合观测值确定接收机初始位置, 无几何距离联合 MW (Melbourne-Wübbena) 组合探测周跳, 忽略历元间电离层、对流层、卫星钟差轨道的变化所引起的误差。

由于测站是静态的, 历元间位移理论上为0, 因此解算结果即误差或噪声。另外, 由于在初始历元算法的起算数据相同, TDCP 与优化 TDCP 的起算数据随着时间逐渐增大, 因此在解算前期, 两种算法解算结果非常接近, 在30 min之内, 两者解算结果差距在亚毫米量级; 在30~60 min, 两者解算结果差距在毫米量级。考虑到两组结果差异较小, 图5展示了第1 000~2 800历元优化前后误差的差距, 其中蓝色为优化前3个坐标方向的解算误差, 红色为优化之后3个坐标方向的误差。表1展示了优化前后位移解在站心坐标系的均方根误差(root mean square error, RMSE)及平均值, 其测站平面精度优于高程精度, 这是由于卫星观测图形强度引起的。由图5及表1可知, 优化前后解算精度无明显差别。

为验证解算效率, 静态实验选取香港 CORS 网中的锦田(HKKT)、南丫岛(HKLM)和蓝地(HKLT)3个测站, 每个测站两个时段, 每个时段1 h的观测数据, 对数据解算时间进行统计, 结果如表2所示, 解算时间平均减少40.39%。

由图5及表1、2可知:(1)优化前后算法精度在同一水平;(2)优化 TDCP 的计算效率较传统算法有很大提高, 解算时间节约40%左右。

### 3.2 动态实验

车辆只有在运动状态下, 才能使用本文模型确定航向角和俯仰角。本文动态实验数据于2019-03-28在中国矿业大学南湖校区用天宝 R10 接收机采集, 其轨迹如图6所示, 总长度约3.1 km。使用 L1 波段数据, 采样频率为1 Hz, 观测时长约15 min, 参考准确姿态由车载实时动态差分(real time kinematic, RTK)得到。



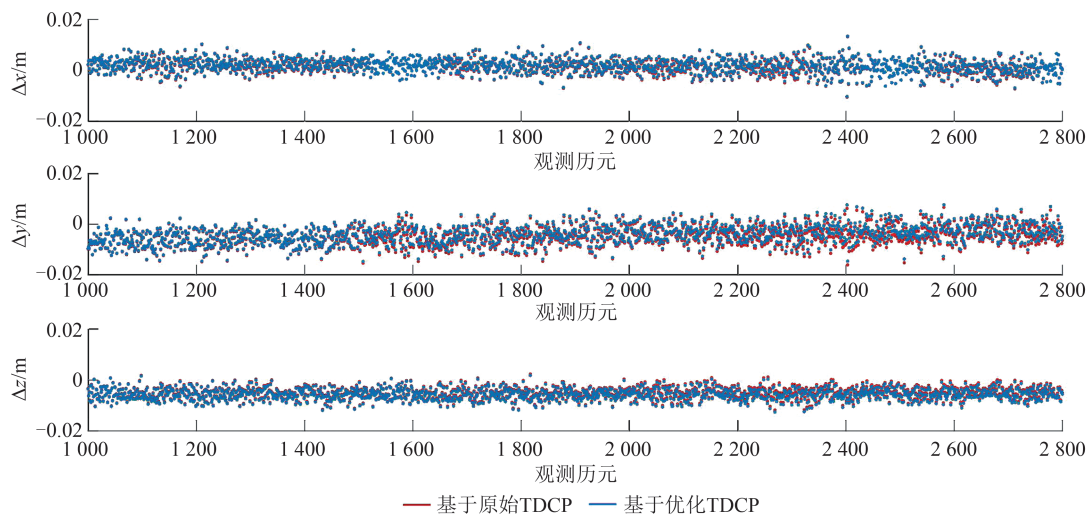


图 5 第 1 000~2 800 历元的位移误差

Fig. 5 Displacement Errors of 1 000th-2 800th Epoch

表 1 TDCP 优化前后位移误差对比/mm

Tab. 1 Comparison of Displacement Errors Before and After TDCP Optimization/mm

静态误差	传统 TDCP			优化 TDCP		
	E 方向	N 方向	U 方向	E 方向	N 方向	U 方向
均值	1.7	-2.5	4.0	-0.6	-2.6	-4.3
RMSE	3.3	4.0	8.1	3.2	7.6	5.0

表 2 TDCP 优化前后处理时间对比

Tab. 2 Comparison of Time Before and After TDCP Optimization

测站时段	传统 TDCP/s	优化 TDCP/s	效率提高比/%
HKKT 122c	16.55	9.69	41.45
HKKT 122d	15.79	9.05	42.69
HKLM 122c	14.90	9.25	37.92
HKLM 122d	15.97	9.27	41.95
HKLT 122c	17.20	10.58	38.49
HKLT 122d	16.75	10.08	39.82



图 6 动态实验轨迹

Fig. 6 Trajectory of Dynamic Experiment

基于改进前后 TDCP 的航向角、俯仰角确定模型的对比结果如图 7 所示,统计结果如表 3 所示。由图 7 和表 3 可知,基于传统 TDCP 的模型航向角 RMSE 为 0.092°,最大误差为 1.264°,改进 TDCP 后模型的航向角总体 RMSE 为 0.089°,最大误差为 1.255°。对于俯仰角,基于 TDCP 模型的 RMSE 为 0.177°,最大误差为 1.344°;而改进 TDCP 后模型的 RMSE 为 0.176°,最大误差为 1.318°。从处理时间上看,改进前模型的运行时间为 4.71 s,而改进后模型的运行时间为 2.61 s,处理时间减少 44.59%。因此得到以下结论:

1)优化 TDCP 算法不会降低其解算精度,但是会缩短处理时间,提高解算速度,可以认为由前一历元坐标和精确位移简单相加得到的下一历元坐标和通过伪距解算的下一历元坐标是非常接近的,且其短时间的差异对航向角和俯仰角的解算结果可以忽略不计;

2)本文模型估计得到的航向角和俯仰角精度最大误差不超过 1.5°,均方根误差小于 0.2°。

此外,由图 7(a)可知,在第 280~500 历元航向角出现较大跳动,首次是因为航向角越过 0°(360°),其他 4 次是因为在基准站附近实验车辆转了两圈,如图 6 车辆轨迹所示;航向角误差超过 1°一次,俯仰角误差超过 1° 3 次,推测是由于路况原因车辆发生抖动所致。动态实验表明,本文提出的模型在精度上具有可靠性,在处理速度上具有优越性,是一个具有实用价值的模型。

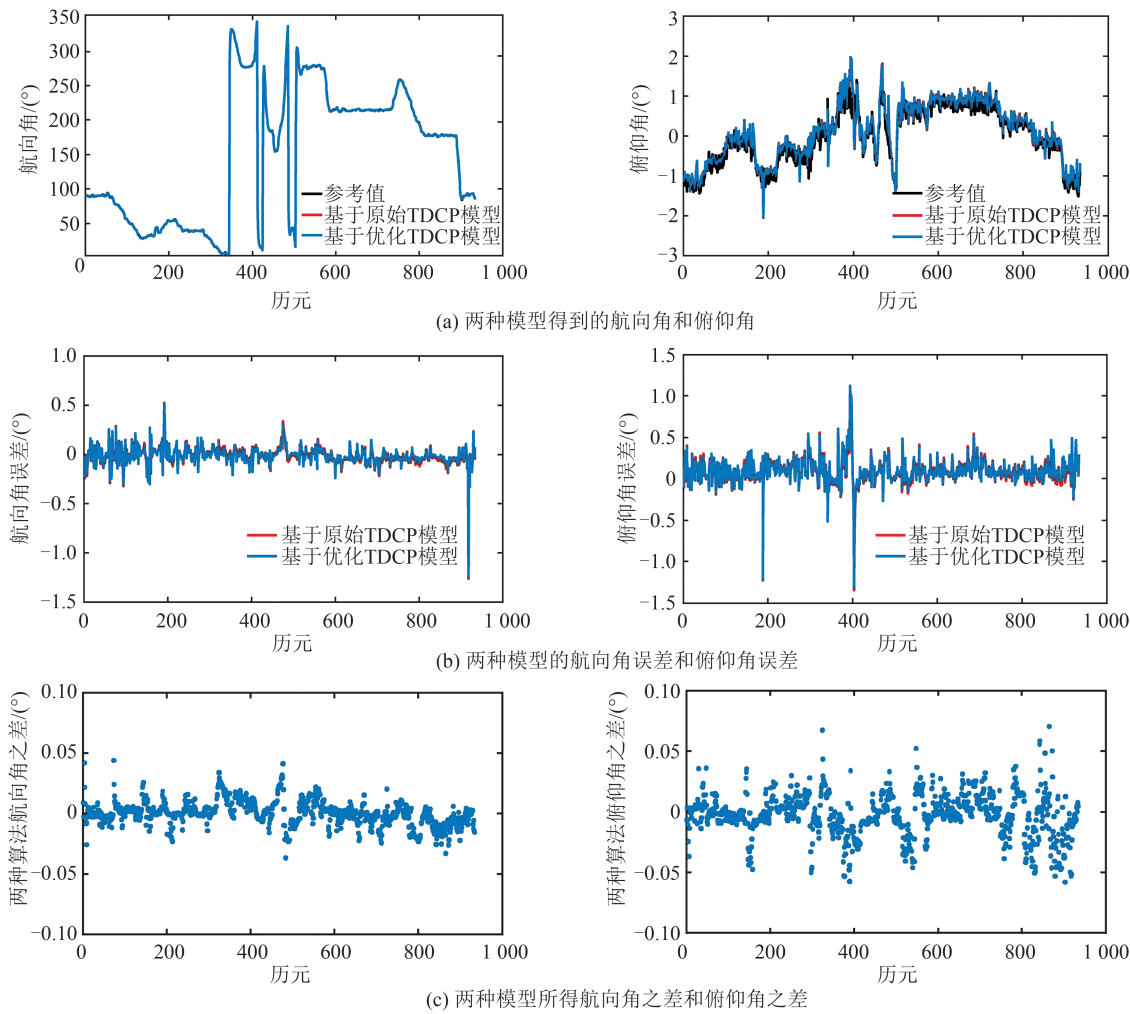


图7 两种模型航向角和俯仰角解算结果

Fig. 7 Calculation Results of Heading and Pitch Using Two Models

表3 两种模型航向角和俯仰角精度比较

Tab. 3 Accuracy Comparison of Heading and Pitch of Two Models

模型	RMSE/(°)		最大误差/(°)		解算时间/s
	航向角	俯仰角	航向角	俯仰角	
基于传统TDCP模型	0.092	0.177	1.264	1.344	4.71
基于改进TDCP模型	0.089	0.176	1.255	1.318	2.61

4 结 语

本文提出一个基于TDCP的车辆航向角和俯仰角估计模型,并对该模型进行静态数据和动态数据实验。通过静态实验验证改进的TDCP算法的精度和计算效率,通过动态实验验证车辆航向角和俯仰角估计模型的可行性与精度,得到以下结论:(1)静态条件下,改进TDCP算法精确位移的精度与优化前在同一水平,解算时间减少约40%。分析算法原理可知,解

算效率提高,其原因是优化后算法在首历元后求解接收机绝对坐标用精确位移和上一历元绝对位置简单相加得到,而不再通过伪距求解。算法求得位移矢量水平方向精度优于垂直方向。(2)动态条件下,本文提出的车辆航向角和俯仰角估计模型可以精确快速估计车辆航向角和俯仰角,最大误差小于1.5°。该模型使用优化的TDCP后可以使位移矢量的解算时间减少约40%,显著提高解算速度。(3)本文模型中优化TDCP算法由于重复使用前一历元接收机绝对位置,所以存在误差累积。但是实验表明,1 h内误差累积不会影响模型的精度。(4)本文模型航向角和俯仰角精度受接收机采样频率及动态性限制,在采样频率过低或者高动态情况下可能不适用。此外,模型数据源单一,在应用中可能存在鲁棒性差等问题,可以考虑使用惯性传感器观测值联合估计航向角和俯仰角。

## 参 考 文 献

- [1] Wei Xiaofeng, Geng Zexun, Lou Bo, et al. A 3D Pose Estimation Method for Space Object[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 96-101. (魏小峰, 耿则勋, 娄博, 等. 空间目标三维姿态估计方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(1): 96-101.)
- [2] Li Tian, Lu Zhaijun, Liu Yinglong, et al. On-line Detection of Car-Body Running Attitude for Railway Vehicle Based on Photogrammetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(7): 1015-1021. (李田, 鲁寨军, 刘应龙, 等. 利用摄影测量在线检测轨道车车辆体运行姿态[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(7): 1015-1021.)
- [3] Lan Jianchao. Research on Attitude Detection of Construction Vehicles[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2018. (兰建潮. 工程车辆的姿态检测研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2018.)
- [4] Niu Jingbo. Vehicle Pose Detection and Its Semantic Map Application [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (牛靖博. 车辆姿态检测及其语义地图应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.)
- [5] Raskaliyev A, Patel S H, Sobh T M, et al. GNSS-based Attitude Determination Techniques—A Comprehensive Literature Survey [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 24873-24886.
- [6] Alban S. Design and Performance of a Robust GPS/INS Attitude System for Automobile Applications [D]. Stanford: Stanford University, 2004.
- [7] Sun R, Cheng Q, Wang J H. Precise Vehicle Dynamic Heading and Pitch Angle Estimation Using Time-Differenced Measurements from a Single GNSS Antenna [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 84.
- [8] Evans A G. Roll, Pitch, and Yaw Determination Using a Global Positioning System Receiver and an Antenna Periodically Moving in a Plane[J]. *Marine Geodesy*, 1986, 10(1): 43-52.
- [9] Groves P D, Handley R J, Parker S T. Vehicle Heading Determination Using Only Single-Antenna GPS and a Single Gyro[C]//The 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Savannah, USA, 2009
- [10] Bahder T B. Attitude Determination from Single-Antenna Carrier-Phase Measurements [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(7): 4677-4684.
- [11] No H, Cho A, Han Y, et al. Attitude Determination Method Using Single-Antenna GPS Gyro and Magnetometer [C]//The Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2012), Jeju, Korea, 2012.
- [12] Ning Jinsheng, Wang Hua, Cheng Pengfei, et al. System Construction and Its Progress of China Geodetic Coordinate System 2000[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(5): 569-573. (宁津生, 王华, 程鹏飞, 等. 2000国家大地坐标系框架体系建设及其进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(5): 569-573.)
- [13] Yin Xiao, Chai Hongzhou, Xiang Mingzhi, et al. GPS/BDS Precise Stand Alone Velocity Determination Using Time-Differenced Carrier Phases [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(2): 226-230. (尹潇, 柴洪洲, 向明志, 等. 历元间载波相位差分的GPS/BDS精密单点测速算法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(2): 226-230.)
- [14] Wang Xingxing, Tu Rui, Hong Ju, et al. BDS Velocity Estimation and Performance Analysis Based on Time-Difference Model[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(1): 7-12. (王星星, 涂锐, 洪菊, 等. 基于历元差分原理的BDS测速模型及性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(1): 7-12.)
- [15] Geng Tao, Ding Zhihui, Xie Xin, et al. Accuracy Assessment of Multi-frequency and Multi-GNSS Velocity Estimation with Time Differenced Carrier Phase Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 206-213. (耿涛, 丁志辉, 谢新, 等. 基于载波相位差分的多频多GNSS测速精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 206-213.)
- [16] Van Graas F, Soloviev A. Precise Velocity Estimation Using a Stand-Alone GPS Receiver[J]. *Navigation*, 2004, 51(4): 283-292.
- [17] Yi Zhonghai, Chen Yuanjun. An Improved GPS Fast Ambiguity Resolution Algorithm with Epoch-Differenced Coordinate Information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 489-494. (易重海, 陈源军. 顾及历元间坐标差信息的GPS模糊度快速固定改进方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(4): 489-494.)
- [18] Ding W D, Wang J L. Precise Velocity Estimation with a Stand-Alone GPS Receiver [J]. *Journal of Navigation*, 2011, 64(2): 311-325.