



基于北斗三号卫星非差多普勒观测信号的优化测速模型

王泽杰¹, 王潜心¹, 商天文²

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 国网物资有限公司, 北京 100054)

摘要: 针对运动载体速度估计方法精度不足、模型复杂等问题, 提出了一种精度高、模型复杂度低的基于北斗三号卫星非差多普勒观测信号的优化测速模型。该模型利用北斗三号卫星原始数据, 使用复杂度低的多普勒测速模型估计载体速度。为提高测速精度和解算效率, 首先对原始模型线性化处理, 然后依据载体航向与其速度矢量的相关性增加松约束。用北斗三号卫星实测数据验证了该模型的测速精度, 评估了该模型的适用性。实验结果表明, 载体静止时, 优化多普勒测速精度可达 cm/s 级甚至 mm/s 级, 在与原始多普勒测速的对比中, 水平方向测速精度提高 60% 左右, 解算时间缩短 24%; 载体运动时, 增加航向约束的多普勒测速精度与原始多普勒测速相比, 北、东方向测速精度可提高 14%~21%, 解算效率提升大约 20%。

关键词: 北斗三号卫星; 多普勒; 航向; 松约束; 线性化

中图分类号: P228

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021267

Optimal velocity estimation model based on non-differential Doppler observations from BDS-3 satellites

WANG Zejie¹, WANG Qianxin¹, SHANG Tianwen²

1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. State Grid Materials Co., Ltd., Beijing 100054, China

Abstract: An optimized velocimetric model based on non-differential Doppler observations from BDS-3 satellites with high accuracy and low model complexity was proposed to address insufficient accuracy and low efficiency of velocity estimation method. The observation data from BDS-3 satellites was used to estimate the carrier velocity by using Doppler velocimetric model with low complexity. In order to improve velocity estimation accuracy and solving efficiency, firstly, the model was linearized, and then loose constraints was added based on the correlation between the carrier heading and its velocity vector. The velocity measurement accuracy of the model was verified with field-collected BDS-3 observations, and the applicability of the model was evaluated. The experimental results show that: when the carrier is stationary, the optimized Doppler velocimetry accuracy can reach cm/s or even mm/s level, and in the comparison with the original Doppler velocimetry, the horizontal velocity accuracy was improved by about 60% and the solution time was shortened by 24%; when the carrier is moving, the Doppler velocimetry accuracy with heading constraints can be improved by 14%~21% in north and east compared with the original Doppler velocimetry, and the solution time was improved by about 20%.

Key words: BDS-3 satellites, Doppler, heading, loose constrain, linearization

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2021-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFA0713502); 国家自然科学基金资助项目 (No.41874039)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFA0713502), The National Natural Science Foundation of China (No.41874039)

1 引言

速度是载体运动状态的重要参数,全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)因其具有高精度、高实时性和成本低的优点,在测速领域被广泛研究。为了提高测速精度,Greenspan等^[1]提出基于GPS的L1载波的测速模型,并通过建立对流层、电离层延迟误差改正模型,使静态测速精度达毫米级,但当观测环境变化时改正模型并不适用。为消除不同环境下对流层、电离层延迟误差对速度测定的影响,可建立站间、星间双差观测方程^[2],但这种方法的缺点是需要两台相距小于10 km的GNSS接收机同步观测,当载体行驶范围扩大时,需要架设更多接收机。为解决人力和仪器成本增加的问题,可将单接收机的载波相位与多普勒观测信号结合,从而有效消除周跳干扰、抑制高频噪声影响^[3],但卫星不足时仅增加观测类型不能得到可靠的测速结果。通过法方程叠加融合GPS和GLONASS数据联合测速^[4]可增加卫星数量,从而增加线性无关方程。根据北斗系统(Beidou navigation satellite system, BDS)与GPS系统间偏差的研究^[5-6],GPS/BDS双系统定位定速模型可以完全融合GPS和BDS观测数据^[7]。GPS/BDS测速跳变情况则可通过广播星历更新法避免^[8]。对比GPS、BDS和GPS/BDS组合定位和定速效果,证明GPS/BDS测速精度更高^[9]。多卫星系统联合测速仍然存在可见卫星不足的情况,惯性导航系统(inertial navigation system, INS)作为独立的导航系统可当作载体测速的主要方法,将它与多普勒测速结合,可有效抑制单一INS的位置发散^[10]。将捷联式惯性导航系统(strap-down inertial navigation system, SINS)与GNSS通过卡尔曼滤波组合可实现短时间内的较高精度的组合测速^[11]。通过建立复杂的模型,测速精度得到提升,但解算时间延长,考虑每5 m的定位偏差仅产生1 mm/s的定速偏差^[12],在建模时所用的载体位置可使用耗时较少的伪距单点定位方法;为更

进一步简化模型,可将测速模型线性化,效率提升近40%,但这种方法存在误差累积,测速精度随时间推移而降低^[13]。同时,北斗三号卫星全球服务给高精度位置服务带来契机^[14],实现可靠的速度解算是北斗三号卫星服务必须考虑的关键问题之一。

由上述载体速度估计方法可知,在速度测量模型复杂的条件下,测速的效率降低,因此本文将原始多普勒测速模型简化;而在速度测量模型简单的条件下,很多类型的误差不能消除,所以精度较低,因此本文中的模型考虑到道路几何变化与载体航向的关系,增加了简单的松约束提高精度。同时,由于目前关于北斗三号卫星测速研究相对缺乏,为了丰富该方向的研究,本文模型采用最新的北斗三号卫星观测数据进行实验。

2 北斗三号卫星多普勒测速建模和优化

北斗三号卫星原始观测方程为:

$$\rho_R^S = \lambda_f \cdot \phi_{R,f}^S + \lambda_f \cdot N_f^S + c \cdot dt^S - c \cdot dt_R - dtrop_R^S + dion_{R,f}^S + \varepsilon_{R,f}^S \quad (1)$$

其中, ρ_R^S 表示卫星S与载体(接收机)R之间的几何距离; λ_f 为频率 f 的波长; $\phi_{R,f}^S$ 表示相应的载波相位观测信号; c 为光速, dt^S 与 dt_R 表示卫星与接收机钟差参数, N 为整周模糊度; $dtrop_R^S$ 与 $dion_{R,f}^S$ 分别表示对流层与电离层改正量; $\varepsilon_{R,f}^S$ 为未模型化的残差。

为引入多普勒观测信息,对式(1)两边同时关于时间求导,即:

$$e_R^S \cdot V_R^S = \lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{dt}_R + c \cdot \dot{dt}^S - \dot{dtrop}_R^S + \dot{dion}_{R,f}^S + \dot{\varepsilon}_{R,f}^S \quad (2)$$

其中, e_R^S 表示卫星与载体连线的方向余弦; 上标“.”为相应的参数变化率; V_R^S 表示载体R相对于卫星S的速度,可表示为:

$$V_R^S = V^S - V_R = \frac{\sqrt{(\dot{X}^S - \dot{X}_R)^2 + (\dot{Y}^S - \dot{Y}_R)^2 + (\dot{Z}^S - \dot{Z}_R)^2}}{\quad} \quad (3)$$



对式(2)进行简化处理后得:

$$e_R^S \cdot V_R^S = \lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + c \cdot \dot{d}_R^S + u_{R,f}^S \quad (4)$$

其中, $u_{R,f}^S$ 为简化后的模型误差; $\dot{\phi}_{R,f}^S$ 为多普勒观测信号。

考虑到载体每个方向的参数估计, 对多普勒观测信号进行矢量分解处理, 用 j 、 k 、 q 表示对应的载体 X 、 Y 与 Z 方向余弦值, 即:

$$\begin{cases} j_R^S \cdot V_R^S = j_R^S \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + c \cdot \dot{d}_R^S + u_{R,f}^S) \\ k_R^S \cdot V_R^S = k_R^S \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + c \cdot \dot{d}_R^S + u_{R,f}^S) \\ q_R^S \cdot V_R^S = q_R^S \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + c \cdot \dot{d}_R^S + u_{R,f}^S) \end{cases} \quad (5)$$

联立式(3)~式(5), 根据误差影响的大小, 令误差 $\xi_{R,f}^S = c \cdot \dot{d}_R^S + u_{R,f}^S$, 可得到相应的参数解算方程:

$$\begin{bmatrix} -1/j_R^S & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1/k_R^S & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1/q_R^S & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_R \\ \dot{Y}_R \\ \dot{Z}_R \\ c \cdot \dot{d}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - \dot{X}^S \\ \lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - \dot{Y}^S \\ \lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - \dot{Z}^S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{R,f}^S \\ \xi_{R,f}^S \\ \xi_{R,f}^S \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, 待求参数包括 $[\dot{X}_R, \dot{Y}_R, \dot{Z}_R, c \cdot \dot{d}_R]$; 为简化模型, 提高测速解算效率, 并考虑北斗三号卫星高频观测数据, 对式(2)进行一阶泰勒级数展开获得相应的线性化关系式, 由公式变换可知:

$$\begin{cases} j_R^S(t_{k+1}) \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + \xi_{R,f}^S) = \rho_X(t_{k+1}) - \rho_X(t_k) \\ k_R^S(t_{k+1}) \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + \xi_{R,f}^S) = \rho_Y(t_{k+1}) - \rho_Y(t_k) \\ q_R^S(t_{k+1}) \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + \xi_{R,f}^S) = \rho_Z(t_{k+1}) - \rho_Z(t_k) \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} \rho_X = \sqrt{(X^S - X_R)^2} \\ \rho_Y = \sqrt{(Y^S - Y_R)^2} \\ \rho_Z = \sqrt{(Z^S - Z_R)^2} \end{cases} \quad (8)$$

载体在 t_{k+1} 处的位置可以表示为:

$$\begin{cases} \rho_X(t_{k+1}) = \rho_X^0(t_k) + \frac{\partial \rho_X}{\partial X} \Big|_{X_{R^0}(t_k)} \cdot \dot{X}_R \\ \rho_Y(t_{k+1}) = \rho_Y^0(t_k) + \frac{\partial \rho_Y}{\partial Y} \Big|_{Y_{R^0}(t_k)} \cdot \dot{Y}_R \\ \rho_Z(t_{k+1}) = \rho_Z^0(t_k) + \frac{\partial \rho_Z}{\partial Z} \Big|_{Z_{R^0}(t_k)} \cdot \dot{Z}_R \end{cases} \quad (9)$$

令:

$$\begin{cases} G_X(t_{k+1}) = \frac{\partial \rho_X}{\partial X} \Big|_{X_{R^0}(t_k)} \\ G_Y(t_{k+1}) = \frac{\partial \rho_Y}{\partial Y} \Big|_{Y_{R^0}(t_k)} \\ G_Z(t_{k+1}) = \frac{\partial \rho_Z}{\partial Z} \Big|_{Z_{R^0}(t_k)} \end{cases} \quad (10)$$

联立式(7)~式(10), 可得载体不同方向的观测方程表达式, 即:

$$\begin{cases} j_R^S(t_{k+1}) \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + \xi_{R,f}^S) = G_X(t_{k+1}) \cdot \dot{X}_R + \dot{X}_{R^0}(t_k) - \dot{X}_R(t_k) \\ k_R^S(t_{k+1}) \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + \xi_{R,f}^S) = G_Y(t_{k+1}) \cdot \dot{Y}_R + \dot{Y}_{R^0}(t_k) - \dot{Y}_R(t_k) \\ q_R^S(t_{k+1}) \cdot (\lambda_f \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - c \cdot \dot{d}_R + \xi_{R,f}^S) = G_Z(t_{k+1}) \cdot \dot{Z}_R + \dot{Z}_{R^0}(t_k) - \dot{Z}_R(t_k) \end{cases} \quad (11)$$

同理, 另一组参数解算方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \frac{G_X(t_{k+1})}{j_{R_i}^{S_j}(t_{k+1})} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \frac{G_Y(t_{k+1})}{k_{R_i}^{S_j}(t_{k+1})} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{G_Z(t_{k+1})}{q_{R_i}^{S_j}(t_{k+1})} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_R \\ \dot{Y}_R \\ \dot{Z}_R \\ c \cdot \dot{d}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_j \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - \frac{\dot{X}_{R^0}(t_k) - \dot{X}_{R_i}(t_k)}{j_{R_i}^{S_j}(t_{k+1})} \\ \lambda_j \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - \frac{\dot{Y}_{R^0}(t_k) - \dot{Y}_{R_i}(t_k)}{k_{R_i}^{S_j}(t_{k+1})} \\ \lambda_j \cdot \dot{\phi}_{R,f}^S - \frac{\dot{Z}_{R^0}(t_k) - \dot{Z}_{R_i}(t_k)}{q_{R_i}^{S_j}(t_{k+1})} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{R,f}^S \\ \xi_{R,f}^S \\ \xi_{R,f}^S \end{bmatrix} \quad (12)$$

式 (12) 即线性化多普勒测速模型的矢量形式。

为进一步提高参数解算精度, 结合载体运动过程中航向与速度之间的关系, 可构建额外的非完整性约束方程。为便于计算, 通常将速度矢量转换至载体坐标系 NEU(north, east, up), 即建立站心直角坐标与空间直角坐标系下的速度关系式^[15]:

$$\begin{pmatrix} \dot{N} \\ \dot{E} \\ \dot{U} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{X}_R \\ \dot{Y}_R \\ \dot{Z}_R \end{pmatrix} \quad (13)$$

其中, B 和 L 分别表示载体的大地经度、纬度。受到道路几何形状和载体运动限制^[16], 短时间内可利用历史轨迹曲线的割线方向代替切线方向, 并作为载体的航向(以车辆为载体, 如图 1 所示), 表示为:

$$\alpha = \begin{cases} \cos^{-1}(\Delta Y_R / \sqrt{(\Delta X_R)^2 + (\Delta Y_R)^2}), & \Delta X_R \geq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\Delta Y_R / \sqrt{(\Delta X_R)^2 + (\Delta Y_R)^2}), & \Delta X_R < 0 \end{cases}$$

$$\Delta X_R = \dot{X}_R(t-1)/f, \quad \Delta Y_R = \dot{Y}_R(t-1)/f \quad (14)$$

因此, 考虑前一历元的航向与当下历元速度之间的相关性, 可施加如下软约束条件, 建立附有约束信息的平差模型^[17]。

$$\sin \alpha \cdot \dot{N} - \cos \alpha \cdot \dot{E} = O_\alpha \quad (15)$$

其中, α 为载体瞬时航向角, O_α 表示非完整性约束后的残差。式 (15) 可表示为:

$$[\sin \alpha - \cos \alpha]$$

$$\begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B & \cos \alpha \\ -\sin L & \cos L & 0 & \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_R \\ \dot{Y}_R \\ \dot{Z}_R \\ c \cdot \dot{t}_R \end{bmatrix} = O_\alpha \quad (16)$$

联立式 (12) 和式 (16) 可解得载体速度。

3 实验分析

为验证本文提出的基于北斗三号卫星多普勒观测信号的优化测速模型, 设计了静态和动态实验, 方案有以下 3 种。

方案一: 利用式 (6) 进行载体速度解算, 即原始非差多普勒测速模型。

方案二: 联立式 (12) 和式 (16), 对原始非差多普勒测速模型线性化处理后, 加入航向约束进行载体速度测定, 即优化非差多普勒测速模型。

方案三: 使用星间、站间、历元间差分载波相位观测信号进行测站速度测定, 即星间、站间、历元间差分载波相位测速模型。

静态实验用于验证优化模型的测速精度、解算效率以及确定动态实验的速度参考来源。理论上, 使用星间、站间、历元间差分载波相位测速模型(方案三)可有效消除区域电离层、对流层延迟误差, 因此理论精度较高^[18], 静态实验将验证方案三能否作为动态实验的速度参考值。

动态实验用于验证优化模型在实际的车辆行驶过程中的适用性。



图 1 载体行驶轨迹、切线方向和割线方向



3.1 静态实验以及动态实验速度参考值的确定

静态实验于2021年2月24日在中国矿业大学进行,使用两台海星达 iRTK5 接收机同步采集北斗三号卫星数据,采样频率为1 Hz。由于接收机静止,速度真值为0,所以静态测速的解算结果即误差。

图2展示了第1~1 600历元间,在站心坐标系下3种方案测速结果的误差,灰色三角形代表原始非差多普勒测速,白色方框代表优化非差多普勒测速,黑色球形代表星间、站间、历元间差分载波相位测速。3种方案静态测速结果在N、E、

U方向和N-E平面上误差均值(mean)、均方根误差(root-mean-square error, RMSE)和解算所用时间见表1。在静态测速中,原始非差多普勒测速精度可达厘米级,优化非差多普勒测速精度可达厘米级甚至毫米级。相比原始非差多普勒测速模型,优化非差多普勒测速误差在N、E方向上具有明显向真值0靠拢的趋势,其测速精度在N方向上提升了62.6%,E方向上提升了65.3%,N-E平面合速度提升了66.8%,但U方向上持平或略有降低,这是因为本文采用的航向约束本质是根

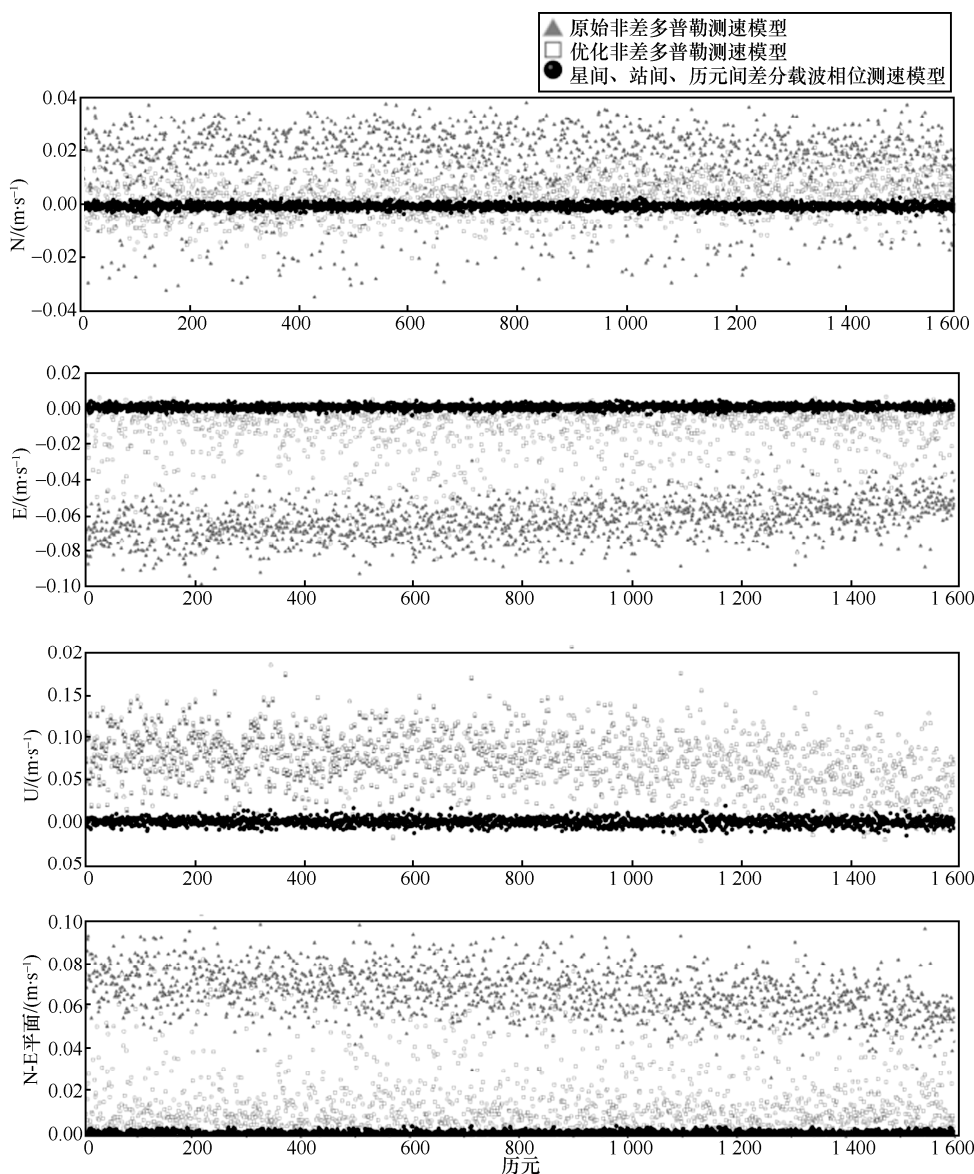


图2 静态实验中第1~1600历元的速度误差

表 1 静态实验中 3 种方案速度解的误差对比

静态/(cm·s ⁻¹)	误差均值			均方根误差				用时/s
	N	E	U	N	E	U	N-E	
方案一	1.40	-6.13	6.64	1.95	6.22	6.52	7.30	4.89
方案二	0.31	-1.34	6.75	0.73	2.16	6.48	2.42	3.70
方案三	0.00	0.00	-0.01	0.25	0.39	0.47	1.27	10.19

据载体航向重新分配水平面上的速度分量,从而达到水平面上的合速度优化,而垂直于水平面的约束条件在本文实验条件下可被忽略。优化非差多普勒测速解算用时比原始非差多普勒测速节省了 24.3%,这是因为前者使用了复杂度较低的线性化测速模型,该模型的构造只需要已知载体初始位置,之后时刻的载体位置可通过累加位移求得,无逐历元单点定位步骤。

星间、站间、历元间差分载波相位测速误差可达亚毫米级,其精度远高于使用非差多普勒观测信号求解速度,因此可以将它作为动态实验中的速度参考值。同时,非差多普勒测速由于只需要一台接收机且无差分处理过程,其时效性远高于星间、站间、历元间差分载波相位测速。

3.2 动态实验

动态实验于 2021 年 2 月 24 日在中国矿业大学附近区域进行,车辆行驶路线及接收机架设情况如图 3 所示,方案一和方案二仅使用移动接收机,参考接收机仅用于方案三中载波相位观测信

号站间差分。动态实验中车辆近似直线运动时北斗三号卫星的星下轨迹如图 4 所示,本次实验可见北斗三号卫星包含 5 颗 MEO 卫星、1 颗 IGSO 卫星和 1 颗 GEO 卫星,实验区域可见北斗三号卫星的空间位置几何精度在 3~5,满足测速模型构建的定位要求^[19]。

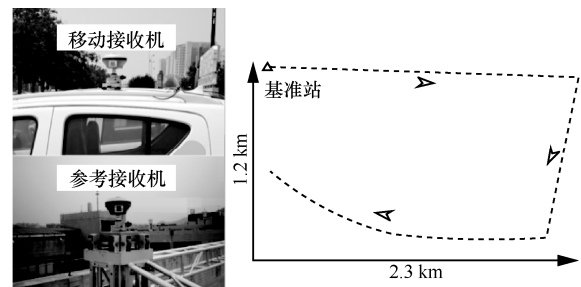


图 3 动态实验中车辆行驶路线及接收机架设情况

图 5 展示了动态实验中星间、站间、历元间差分载波相位测速模型解得的参考速度和航向变化。车辆在不同方向的速度均低于 15 m/s, U 方向速度接近 0 m/s,实验所选道路较为平坦。对应速度参考值曲线可知,航向变化曲线中较为平缓

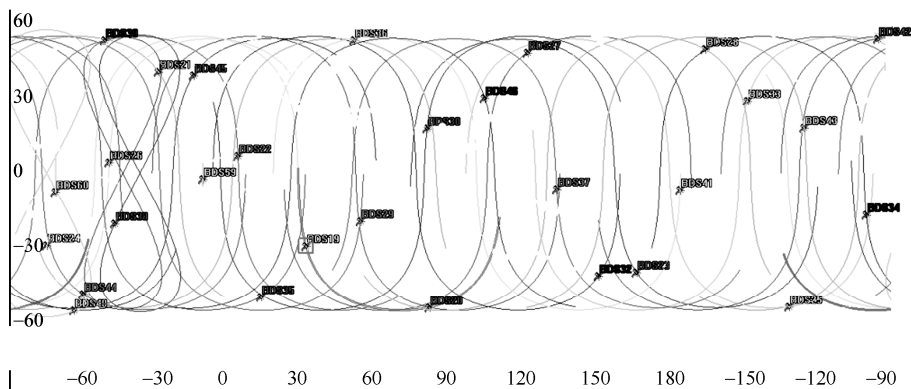


图 4 动态实验中车辆近似直线运动时北斗三号卫星的星下轨迹

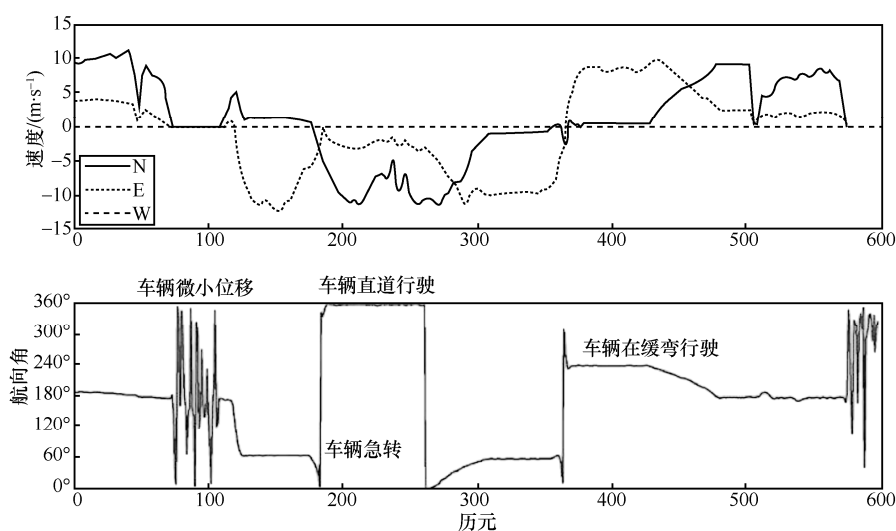


图5 动态实验的参考速度和航向变化

的部分表示车辆行驶于直道或缓弯, 陡峭的部分表示车辆急转, 另外, 由于本文使用的航向估计方法依赖历史轨迹, 当车辆发生微小位移时航向出现跳变。

动态实验中原始非差多普勒测速结果和优化非差多普勒测速结果相对于参考速度的误差如图6所示, 在动态实验的多数历元间, 优化非差多普勒测速精度高于原始非差多普勒测速。但第150~200历元间、第500~530历元间, 两种多普勒测速精度均有明显下降, 其原因是多路径效应的影响。在第180、290、370历元附近, 优化非差多普勒测速精度反而低于原始非差多普勒测速精度, 结合图5所示航向变化可知, N、E方向速度的大小在这几个历元附近发生交替, 即车辆转弯角度大于 90° , 车辆行驶轨迹的割线方向不能很好地代替切线方向, 航向估计出现粗差, 因而导致速度解算的约束条件失效。

动态实验中两种方案速度解的误差对比见表2。在动态实验中, 原始非差多普勒测速模型和优化非差多普勒测速模型的测速精度均为分米级。相比原始非差多普勒测速模型, 优化非差多普勒测速精度在N方向上提升了13.8%, E方向上提升了24.6%, U方向上持平。造成N、E方向

上精度提升不同的原因是, 在实验所选取的600个历元间, 车辆在E方向上的总体位移大于在N方向上的总体位移, 航向约束效果更加明显。相比静态测速结果, 动态测速在N、E方向的精度提升较小。优化非差多普勒测速解算效率较原始非差多普勒测速解算效率提升了21.9%, 与静态实验中的效率提升相近, 结合图5所示速度参考值可知, 在各个方向速度低于15 m/s的情况下, 本文所用的线性化方法适用。

4 结束语

本文提出一种基于北斗三号卫星非差多普勒观测信号的优化测速模型。对该模型进行静态和动态测试后, 可得如下结论。

(1) 载体处于静止时, 优化非差多普勒测速精度相比原始非差多普勒测速精度在N、E方向提升超过60%, 在U方向无明显提升, 分析建模原理可知, 其原因是航向约束是一种松约束, 仅作用于水平速度分量。

(2) 载体处于直线行驶或转弯小于 90° 时, 优化方法可将N方向和E方向的测速精度提升10%~20%, 其原因是航向约束顾及了车辆行驶轨迹和速度的相关关系; 但当载体转弯超过 90° 时优

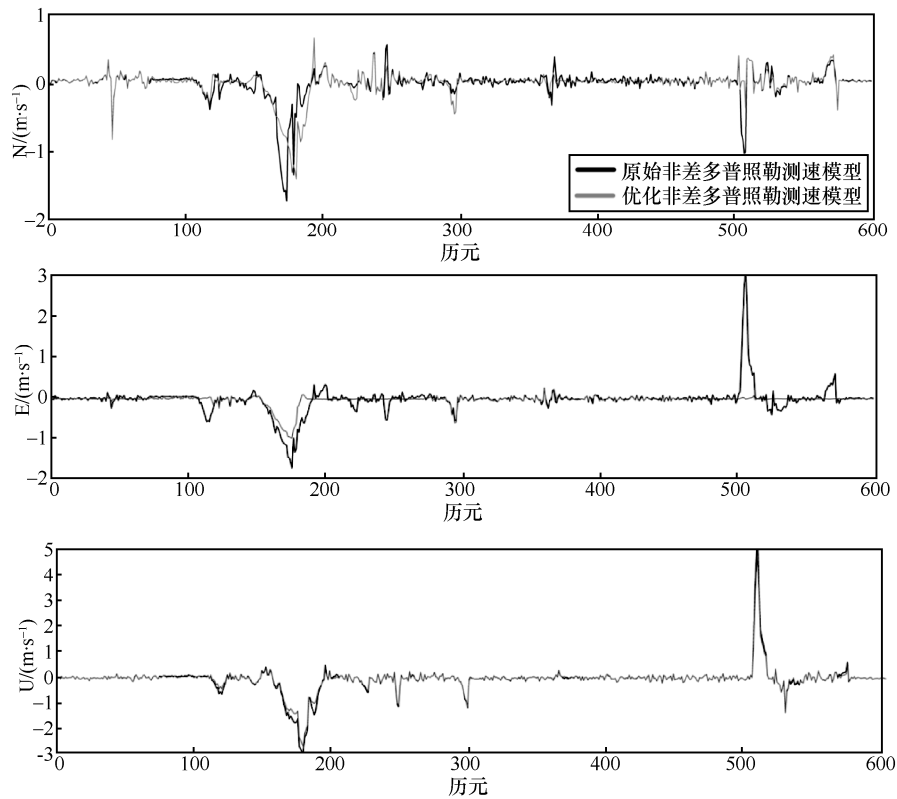


图6 动态实验中原始非差多普勒测速误差和优化非差多普勒测速结果相对于参考速度的误差

表2 动态实验中两种方案速度解的误差对比

动态/(dm·s ⁻¹)	均方根误差			用时/s
	N	E	U	
原始非差多普勒测速	2.24	3.25	5.01	2.38
优化非差多普勒测速	1.93	2.45	4.92	1.86

化方法失效, 其原因是航向解算有粗差, 需要通过提高采样频率或改进航向估计方法提升航向精度。

(3) 优化非差多普勒测速模型比原始非差多普勒测速模型节省约 20% 的解算时间, 其原因是, 通过线性化方法构造的测速模型只需要载体初始位置, 之后时刻的载体位置则可通过加入位移求得, 故而省略了独立单点定位的时间, 但这种方法可行的条件是: 原始多普勒测速模型的构建对载体精度要求较低。

参考文献:

- [1] GREENSPAN R L, DONNA J I. Measurement errors in GPS observables[J]. Navigation, 1986, 33(4): 319-334.
- [2] 王潜心. 机载 GPS 动态定位定速与定姿理论研究及软件开发[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
WANG Q X. Research of airborne GPS kinematic position velocity and attitude determination and software development[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [3] 姚曜, 张帆, 杜红松, 等. 联合多普勒的载波相位精密测速方法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(3): 310-315.
YAO Y, ZHANG F, DU H S, et al. Velocity measurement method using carrier phase time-difference with Doppler observations[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(3): 310-315.
- [4] WANG Q X. Integrated carrier phase and Doppler observations of GPS and GLONASS for precise velocity determination[J]. 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2011, ION GNSS 2011, 2011, 3: 2303-2309.
- [5] 张辉, 郝金明, 田英国, 等. BDS/GPS 接收机系统间偏差稳定性分析[J]. 天文学报, 2017, 58(4): 14-25.
ZHANG H, HAO J M, TIAN Y G, et al. Stability analysis of receiver ISB for BDS/GPS[J]. Acta Astronomica Sinica, 2017, 58(4): 14-25.
- [6] 党亚民, 张龙平, 陈俊勇. 多 GNSS 系统精密定轨 ISB/IFB 估计及特性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 2079-2084, 2138.



- DANG Y M, ZHANG L P, CHEN J Y. ISB/IFB estimation and characteristic analysis with multi-GNSS precise orbit determination[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2079-2084, 2138.
- [7] DAI F C, MAO X C. BDS/GPS dual systems positioning based on Kalman filter in urban canyon environments[C]//*Proceedings of 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1882-1883.
- [8] 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.
- YIN X, CHAI H Z, XIANG M Z, et al. GPS/BDS precise standalone velocity determination using time-differenced carrier phases[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(2): 226-230.
- [9] LI X, GUO J M, ZHOU L. Performance analysis of BDS/GPS kinematic vehicle positioning in various observation conditions[J]. *Sensor Review*, 2016, 36(3): 249-256.
- [10] SOON B K H, SCHEDING S, LEE H K, et al. An approach to aid INS using time-differenced GPS carrier phase (TDCP) measurements[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(4): 261-271.
- [11] 韩松来. GPS和捷联惯导组合导航新方法 & 系统误差补偿方案研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- HAN S L. Novel GPS/SINS integration architecture and systematic error compensation methods[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [12] 何海波, 杨元喜, 孙中苗, 等. GPS多普勒频移测量速度模型与误差分析[J]. *测绘学院学报*, 2003, 20(2): 79-82.
- HE H B, YANG Y X, SUN Z M, et al. Mathematic model and error analyses for velocity determination using GPS Doppler measurements[J]. *Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping*, 2003, 20(2): 79-82.
- [13] 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)*, 2020: 1-8.
- WANG Y Y, WANG Z Y, HU C, et al. Vehicle attitude estimation model using optimized time-differenced carrier phase[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020: 1-8.
- [14] 杨元喜, 杨诚, 任夏. PNT智能服务[J]. *测绘学报*, 2021, 50(8): 1006-1012.
- YANG Y X, YANG C, REN X. PNT intelligent services[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1006-1012.
- [15] 伍吉仓, 邓康伟, 陈永奇. 地心坐标系与站心坐标系中的速度转换及误差传播[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(3): 13-18.
- WU J C, DENG K W, CHEN Y Q. Velocity transformation and error propagation between geocentric coordinate system and site-centric coordinate system[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2005, 25(3): 13-18.
- [16] 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.
- [17] 曾安敏, 杨元喜, 欧阳桂崇. 附加约束条件的序贯平差[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(2): 183-186.
- ZENG A M, YANG Y X, OUYANG G C. Sequential adjustment with constraints among parameters[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(2): 183-186.
- [18] 郑凯, 刘站科, 肖学年, 等. 航空重力GPS测速多粗差探测方法[J]. *测绘学报*, 2016, 45(6): 663-669.
- ZHENG K, LIU Z K, XIAO X N, et al. Method of multi-dimensional gross errors snooping of GPS velocity estimation in airborne gravimetry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(6): 663-669.
- [19] 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)*, 2021: 1-11.
- GENG T, DING Z H, XIE X, 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*, 2021: 1-11.

[作者简介]



王泽杰(1994—), 男, 中国矿业大学环境与测绘学院硕士生, 主要研究方向为卫星定位导航。



王潜心(1980—), 男, 博士, 中国矿业大学环境与测绘学院教授, 主要研究方向为卫星定位导航、大地测量数据处理、卫星遥感。



商天文(1994—), 男, 现就职于国网物资有限公司, 主要研究方向为供应链运营。