

北斗卫星导航系统接收机测量误差建模及估计

多丽娅, 张丽杰

(内蒙古工业大学 电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 减小北斗卫星导航系统接收机的测量误差是提高其性能的主要措施之一。采用时间序列分析法对北斗卫星导航系统接收机模块 UM220 的测量误差进行建模, 并依据模型对测量误差进行卡尔曼滤波。实验结果表明, 北斗卫星导航系统接收机的测量误差可采用 ARMA(2,2) 或 ARMA(1,1) 模型; 卡尔曼滤波后, 静态测量误差标准差至少减小了 28.86%, 动态测量误差标准差至少减小了 48.63%。

关键词: 北斗卫星导航系统; 误差建模; ARMA; 卡尔曼滤波

中图分类号: P228.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0137-06

Modeling and estimating of BDS receiving module measurement error

Duo Liya, Zhang Lijie

(College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Reducing the measurement error of BeiDou Navigation Satellite System(BDS) receiving module is an effective method to improve its performance. Time series analysis method was utilized to model the measurement error generated from the measuring results of BDS receiving module UM220 and Kalman filtering was used to reduce the measurement error of BDS receiving module according to the built error models. The experiment results show that measurement error of BDS receiving module can be modeled with ARMA(2,2) or ARMA(1,1), and through Kalman filtering the standard deviation of static sequence is reduced by at least 28.86% and the standard deviation of dynamic sequence is reduced by at least 48.63% compared with the original sequence.

Key words: BDS; error modeling; ARMA; Kalman filtering

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2012MS0924); 内蒙古重大基础研究开放课题(2015 机电控制重点实验室)

作者简介: 多丽娅(1988-), 女, 硕士生, 主要从事卫星导航方面的研究。Email: sixpieces@126.com

通讯作者: 张丽杰(1973-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事导航、检测与控制方面的研究。Email: ljzhangen@sina.com

0 引言

北斗卫星导航系统是中国正在实施的自主发展、独立运行的全球卫星导航系统,经历了由北斗一号向北斗二号的发展过程^[1]。“北斗一号”的性能和美国的 GPS 相比差距甚大,因此国内在“北斗一号”的基础上,借鉴国外卫星导航系统的成功经验,从 2007 年开始正式建设北斗卫星导航定位系统——北斗二号。2012 年,北斗系统已具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力;2020 年左右,国内计划建成覆盖全球的北斗卫星导航系统^[2]。对卫星接收机进行误差建模研究,对提高卫星导航测量精度和实际的应用具有重要的意义。北斗卫星导航系统由于刚刚投入运行,其应用阶段的相关研究成果不但相对较少,而且主要集中在“北斗一号”系统方面。

文中采用和芯星通公司生产的数据更新率为 1 Hz 的 UM220 BDS/GPS 双系统导航/授时模块接收北斗系统的卫星信号,采用时间序列分析法对其测量误差建模,并根据误差模型建立状态空间模型,设计卡尔曼滤波器,对位置和速度误差进行卡尔曼滤波,从而提高北斗接收机测量精度。

1 北斗误差序列建模

1.1 北斗接收机数据误差分离与分析

通过串口采集接收机静态和动态时的经纬度、速度信息,采用高斯-克吕格投影将定位数据由空间坐标系转换为平面直角坐标系下的位置数据(X, Y)^[3]。

用转换得到的位置数据的均值作为接收机静态时的基准测量数据;用幂级数多项式拟合曲线作为接收机动态时的基准测量数据^[4],分离出测量数据中

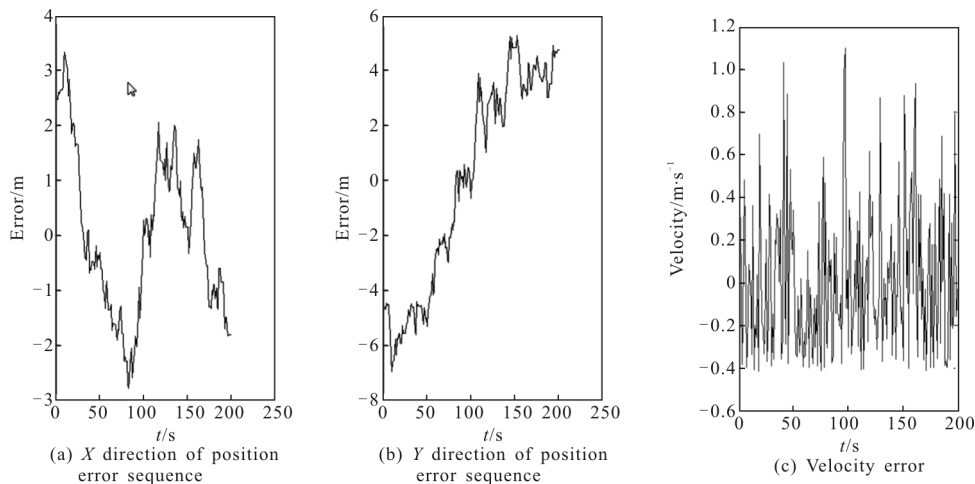


图 1 北斗接收机静态位置、速度误差序列

Fig.1 BeiDou receiver static position, velocity error

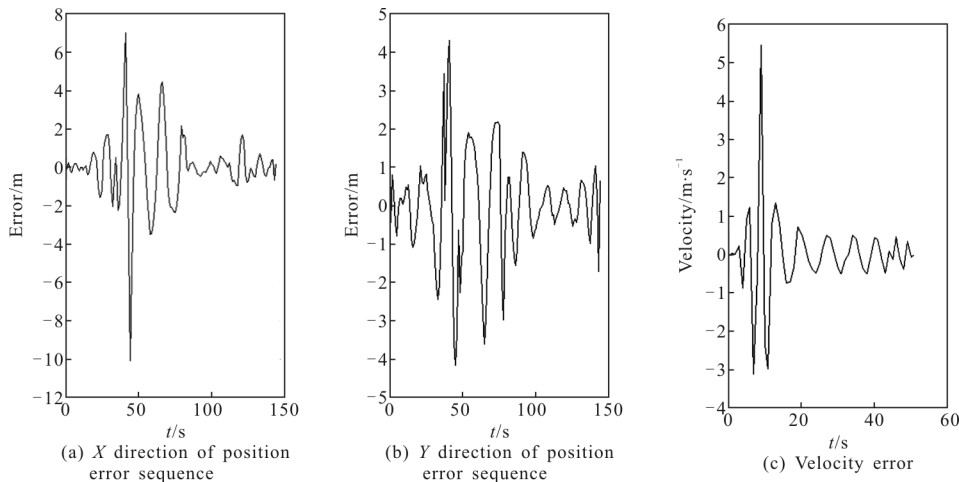


图 2 北斗接收机动态位置、速度误差序列

Fig.2 BeiDou receiver dynamic position, velocity error sequence

的误差,分离得到的误差序列如图 1 和图 2 所示。

时间序列分析法是对随机序列建模的常用方法,但要求随机序列是平稳随机过程。文中采用游程检验法分别对图 1 和图 2 中的误差数据进行平稳性检验^[5],统计量 $|Z|>1.96$;对误差序列的差分序列再次进行平稳性检验,统计量 $|Z|<1.96$ 。说明去趋势后的北斗接收机误差序列为平稳随机过程,可采用时间序列分析法对其建模。

1.2 模型的辨识

模型的辨识包括以下三步:

(一) 初步确定误差序列所属的时间序列模型的类型。分别分析接收机处于静态和动态时的速度测量误差序列的自相关和偏相关特性,如图 3 所示。

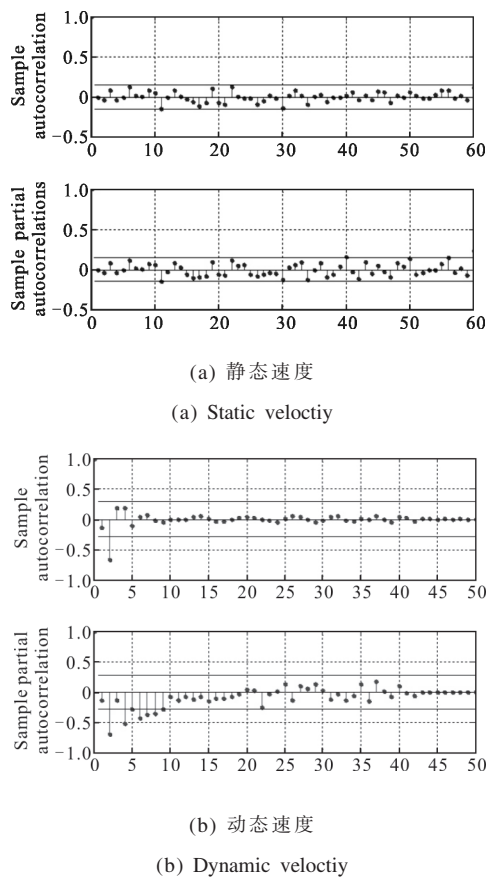


图 3 速度误差序列的自相关、偏相关函数

Fig.3 Autocorrelation, partial correlation function of velocity error sequence

由图 3 可知,速度误差序列的自相关和偏相关函数均是拖尾的。同理,对位置误差序列的自相关和偏相关特性也进行类似分析,可得到其自相关和偏相关函数也均是拖尾的。因此,可采用 ARMA 模型

对北斗接收机的速度测量误差建模,即模型定义为:

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (1)$$

式中: p, q 为阶数; ε_t 为零均值、方差为 σ_ε^2 的平稳白噪声。

(二) 对模型进行定阶,即确定公式(1)中的 p, q 值。常用的模型定阶方法有 ACF 和 PACF 定阶法、AIC 定阶法、BIC 定阶法等几种,考虑到 BIC 准则选定的阶数往往比较接近真实模型的阶数,文中选择 BIC 定阶法对北斗测量误差的 ARMA 模型定阶, BIC 准则函数的定义为^[5]:

$$BIC(p, q) = N \ln \hat{\sigma}_\varepsilon^2 + n \ln N \quad (0 \leq p \leq L, 0 \leq q \leq L) \quad (2)$$

式中: N 为给定的样本数据个数; $\hat{\sigma}_\varepsilon^2$ 为模型的残差方差; n 为待估参数个数, $n=p+q+1$ (可能存在常数项)。选取不同的 p, q , 使公式(2)达到最小值时的 p, q 就是最佳模型阶数。

在运用定阶准则时,需要给定阶数的最大范围 L 。根据经验,一般可取阶数的上限为 $\ln N$ (N 为数据量)^[6]。由于文中采用的误差序列样本个数为 200, 所以阶数 p 和 q 的上限为 5。定阶结果为:(1) 动态 X 坐标方向和动态速度误差数据需采用 ARMA(2, 2) 模型外;(2) 其它误差数据均采用 ARMA(1, 1) 模型。

(三) 参数估计。采用最小二乘估计法,对各模型进行参数估计,结果见表 1。

表 1 误差模型

Tab.1 Error modeling

	Static	Dynamic
X	$X_t = -0.536X_{t-1} + \varepsilon_t + 0.508\varepsilon_{t-1}$	$X_t = 1.33X_{t-1} - 0.68X_{t-2} + \varepsilon_t - 1.92\varepsilon_{t-1} + 0.93\varepsilon_{t-2}$
Y	$X_t = 0.86X_{t-1} + \varepsilon_t - 0.92\varepsilon_{t-1}$	$X_t = 0.374X_{t-1} + \varepsilon_t - 0.94\varepsilon_{t-1}$
v	$X_t = 0.23X_{t-1} + \varepsilon_t - 0.25\varepsilon_{t-1}$	$X_t = -0.24X_{t-1} - 0.6X_{t-2} + \varepsilon_t - 0.42\varepsilon_{t-1} - 0.57\varepsilon_{t-2}$

1.3 模型的检验

文中采用定性和定量分析方法检验所建的模型是否合适。

(一) 定性分析检验。分离接收机在某(可任选)时间地点采集到的位置数据和速度数据的误差,同时运用表 1 中的模型估计误差,估计结果如图 4 所

示。由图 4 可知,所建误差模型基本可以预测随机采集误差序列的趋势。

(二) 定量分析检验。采用残差分析方法检验建立的模型是否合适^[7],即对所建模型进行 Q 检验,实

现方法是将依据表 1 计算的模型残差代入 MATLAB 中的 lbqtest 函数,可得输出参数 H 均为 0,表明模型的残差序列为白噪声序列,且不具有相关性,说明所建模型能较好的描述误差序列。

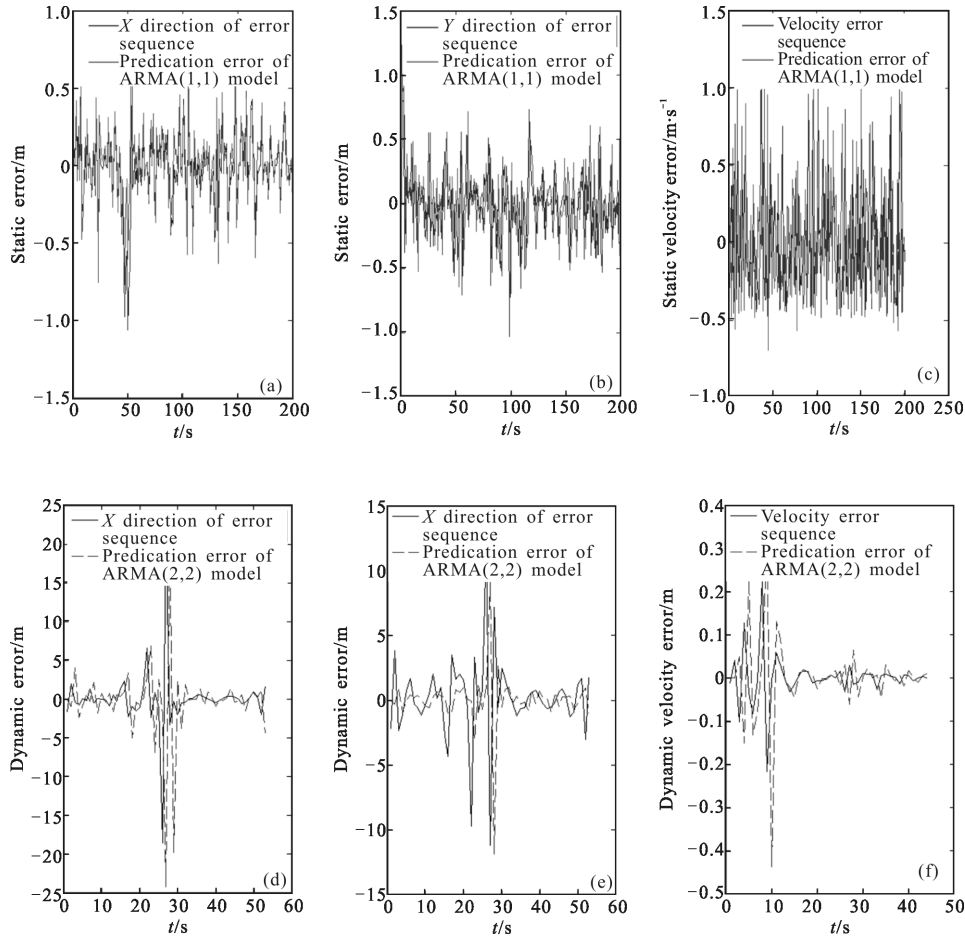


图 4 误差序列与建模结果对比

Fig.4 Error sequence comparison with modeling results

2 北斗接收机的测量误差补偿

2.1 误差状态空间模型的建立

文中采用卡尔曼滤波对测量误差进行补偿。将公式(1)的 ARMA 模型转化为:

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \dots + \varphi_m X_{t-m} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_{m-1} \varepsilon_{t-m+1} \quad (3)$$

式中: $m = \max(p, q+1)$ 。根据公式(3),可得用于接收机测量误差卡尔曼滤波的状态方程为:

$$X_t = AX_{t-1} + BE_t \quad (4)$$

式中: $X_t = [X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-m+1}]^T$; $E_t = [\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \dots, \varepsilon_{t-m+1}]^T$;

$$A = \begin{bmatrix} \varphi^* & \varphi_m \\ I_{m-1} & 0_{m-1} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \theta^* \\ 0_{m-1,m} \end{bmatrix}; \varphi^* = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{m-1}]; \theta^* =$$

$[1, -\theta_1, \dots, \theta_{m-1}]$ 参数 θ_i 和 $\varphi_i (i=1 \dots m-1)$ 的取值见表 1。

同时,文中采用北斗卫星接收机的测量误差 Z_k 作为量测信息,则误差的量测方程为:

$$Z_t = CX_t + V_t \quad (5)$$

式中: $C = [1, 0, \dots, 0]$; V_t 为量测噪声。

由于滤波初始值 \hat{X}_0 和 P_0 对滤波精度的影响将随时间逐渐衰减至零,所以为了加快收敛速度,文中取 $\hat{X}_0 = 0, P_0 = 20I$ 。

2.2 静态误差估计实验

对北斗接收机的测量误差进行卡尔曼滤波,滤波结果如图 5 所示,滤波前后的误差标准差见表 2。

从图 5 可以看出,卡尔曼滤波后的测量误差比原始测量误差大幅减小;由表 2 可知,滤波后 X、Y 方向的误差标准差比原误差序列标准差分别减少了

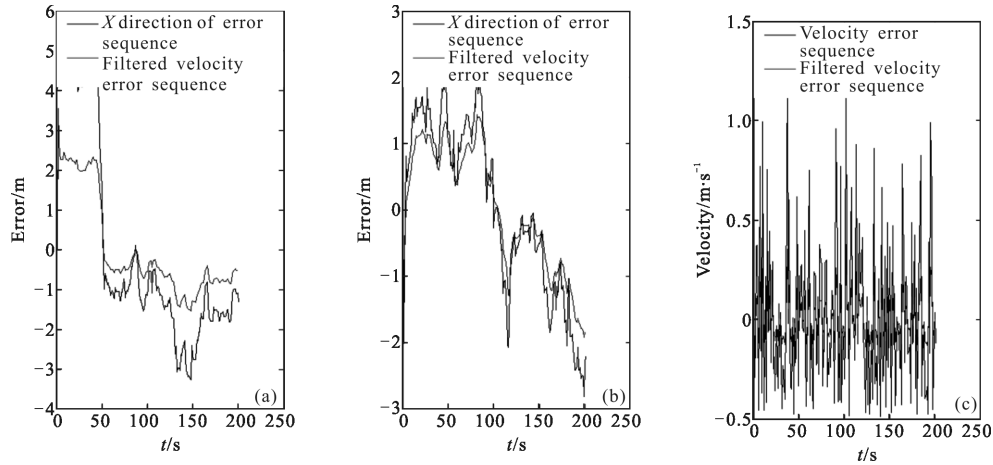


图 5 静态误差卡尔曼滤波结果

Fig.5 Kalman filtering results of static error

50.16%和 28.86%,速度误差标准差比原误差序列标准差减少了 72.05%。

表 2 滤波前后误差序列标准差

Tab.2 Standard deviation of error sequence before and after filtering

	Position X/m	Position Y/m	Velocity/m·s ⁻¹
Before filtering	2.616 1	1.306 1	0.372 1
After filtering	1.303 9	0.929 2	0.104 0

2.3 动态误差估计实验

对运行速度为 30 km/h 的车载北斗接收机测量误差进行卡尔曼滤波,并与原始误差序列进行对比,结果如图 6 所示,滤波前后的误差标准差见表 3。

从图 6 可以看出,卡尔曼滤波后误差比原始误差大幅减小,由表 3 可知,滤波后 X、Y 方向的误差标准差比原误差序列标准差分别减少了 58.43%和 48.63%,速度误差比原误差序列标准差减少了 36.07%。

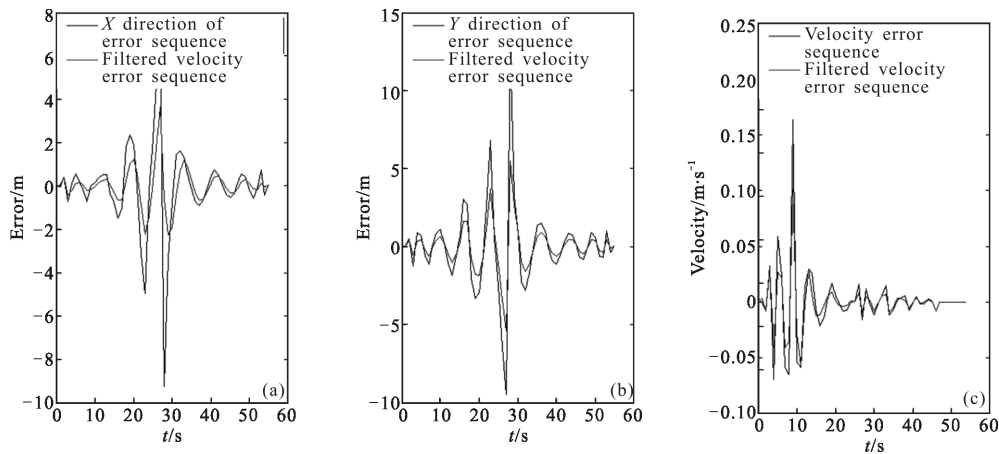


图 6 动态误差卡尔曼滤波结果

Fig.6 Kalman filtering results of dynamic error

表 3 滤波前后误差序列标准差

Tab.3 Standard deviation of error sequence before and after filtering

	Position X/m	Position Y/m	Velocity/m·s ⁻¹
Before filtering	2.149	2.897	0.035 2
After filtering	0.893 2	1.488	0.022 5

3 结 论

文中采用时间序列分析法对北斗接收机的测量误差进行建模,并将误差模型用于卡尔曼滤波中。实验结果表明,北斗接收机的测量误差可采用 ARMA(2,2)或 ARMA(1,1)模型;卡尔曼滤波后可使北斗接收机的静态测量噪声至少减少 28.86%、动态测量噪声至少减少 48.63%,使静态时的位置误差标准差小于 1.303 9 m、速度误差标准差小于 0.104 0 m/s,使动态时的位置误差标准差小于 1.488 m、速度误差标准差小于 0.022 5 m/s。

文中所建的北斗接收机误差模型具有很好的适用性,对测量误差的残差信号进行卡尔曼滤波可有效降低其测量误差。文中的研究结果对于推广使用北斗卫星导航系统具有积极的意义。

参 考 文 献:

- [1] Yang Yuanxi. The development and application of Beidou satellite navigation system[J]. *The Chinese Geophysics*, 2012 (3): 281-286. (in Chinese)
杨元喜. 北斗卫星导航系统的发展及其应用[C]. 中国地球物理, 2012(3): 281-286.
- [2] Guo Shuxia, Dong Zhongyao, Gao Ying. Construction method of anti-jamming performance test system for navigation satellite receive[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2151-2152. (in Chinese)
郭淑霞, 董中要, 高颖. 卫星导航接收端抗干扰性能测试平台构建方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2151-2152.
- [3] Gao Wei, Wu Wenkai, Yuan Chao, et al. The coordinates conversion of Gauss Projection [J]. *Iron Technology*, 2008 (1): 4-8. (in Chinese)
高伟, 吴文凯, 袁超, 等. 高斯投影坐标变换[J]. 钢铁技术, 2008(1): 4-8.
- [4] Zhou Jun, Zhang Peng, Song Baihua. Anaysis and modeling of GPS positioning error for navigation of agricultural machinery [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010(4): 189-192, 198. (in Chinese)
周俊, 张鹏, 宋百华. 农业机械导航中的 GPS 定位误差分析与建模[J]. 农业机械学报, 2010(4): 189-192, 198.
- [5] Xiao Zhihong, Guo Mingyue. Analysis of Time Series and Application of SAS [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009. (in Chinese)
肖枝洪, 郭明月. 时间序列分析与 SAS 应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
- [6] Wang Yi, Zhao Jianjun, Fu Longwen, et al. Analysis of GPS positioning error based on time series [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2012(2): 45-49. (in Chinese)
王毅, 赵建军, 付龙文, 等. 基于时间序列的 GPS 定位误差分析[J]. 现代科学仪器, 2012(2): 45-49.
- [7] Xue Guoyi, Zhou Zhimin, Wang Jian, et al. Analysis and modeling of GPS error under circumstances of fast motion [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006 (4): 30-34. (in Chinese)
薛国义, 周智敏, 王建, 等. 机载环境下的 GPS 测量误差分析和建模[J]. 中国惯性技术学报, 2006(4): 30-34.