

文章编号: 1001-1595(2011)02-0220-06

GPS/ Doppler 导航随机模型的移动窗口实时估计算法

周泽波^{1,2}, 沈云中¹, 李博峰¹

1. 同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092; 2. 电子科技大学 空天科学技术研究院, 四川 成都 610054

Moving Time window Based Real-time Estimation Algorithm for the Stochastic Model of GPS/ Doppler Navigation

ZHOU Zebo^{1,2}, SHEN Yunzhong¹, LI Bofeng¹

1. Department of Surveying and Geomatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

Abstract A two-step method for estimating the stochastic model of GPS/ Doppler integrated observation is proposed. Firstly, the robustly posterior estimation is introduced according to equivalent weight principle and carrier-to-noise ratio. Then, the variance of unit weight is estimated in a moving window in real time by combining the forgetting factor and observation redundancy. Finally, a real vehicular GPS data is carried out to demonstrate the performance of the proposed method. The results show that the present method improves the precision and reliability of navigation solutions significantly.

Key words: GPS/ Doppler; stochastic model; unit weight variance; robust estimation

摘要: 引进时间遗忘因子和观测冗余度因子, 有效地平衡移动窗口内不同时刻的观测数据及其冗余情况对单位权方差估值的贡献, 改进单位权方差的移动开窗实时估计算法。采用载噪比模型确定观测矩阵, 等价权抗差估计方法处理粗差。实测车载 GPS/ Doppler 数据的处理结果表明: 采用本文算法显著提高 GPS/ Doppler 的导航精度与可靠性。

关键词: GPS/ Doppler; 随机模型; 单位权方差; 抗差估计

中图分类号: P228 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40874016)

1 引言

由于 GPS 观测信号传播过程中受到卫星相关误差、传播路径相关误差(对流层、电离层延迟)、接收机相关误差以及多路径误差等多种误差源的影响^[1-3], 导致各项误差难以相互分离。虽然采用相对定位模式可消除或削弱强相关性误差的影响, 但多路径误差的系统性和随机性并存, 无法通过差分方式有效地削弱^[4], 也很难用模型有效地改正^[5]。对于 GPS 码和多普勒观测值而言, 时变的观测环境使得多路径效应成为了城市导航中的重要误差源^[6-7]。

由于信噪比(SNR)主要受天线增益参数、接收机中相关器的状态和多路径效应的影响^[8], 其数值与载噪比 C/N₀ 接近, 因此, 可根据 SNR 或 C/N₀ 定权以削弱多路径效应, 大量试验结果也验证了该方法可有效抵制多路径效应^[4, 9-13]。文献[14]通过实际 GPS 城市导航数据论证了信噪比较等方差模型显著降低了多路径效应对导航精度的影响。当利用 Kalman 滤波进行导航解算时, 为有效抑制实

验信息(包括状态参数及误差分布、过程噪声)异常, 发展了 SAGE 滤波, 自适应抗差滤波等^[15-16]。对于动态系统, 具有时变特性的观测信息随机模型也是影响滤波精度与可靠性的重要因素。文献[17]提出利用高度角模型确定先验协因数信息, 再利用多个历元的残差信息估计观测值的单位权方差分量, 以获得方差协方差信息, 该方法的基本前提假设在于高度角模型的合理性以及观测噪声的不变性。文献[18]提出了利用残差开窗实时地估计 GPS 相位观测值的方差-协方差矩阵。

本文引入基于等价权原理和载噪比模型的验后抗差估计, 然后, 利用移动开窗技术并综合遗忘因子和观测冗余度实时地估计单位权方差因子。最后, 采用一组实测的车载 GPS 数据验证了本文算法的有效性。

2 GPS Doppler 导航的随机模型估计

2.1 GPS/ Doppler 组合导航的 Kalman 滤波

Kalman 滤波作为经典的滤波理论已经广泛

用于导航领域。GPS/Doppler 卡尔曼滤波的状态及观测方程可由式(1)表示

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \Phi_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{l}_k &= f(\mathbf{x}_k) + \mathbf{e}_k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, \mathbf{x}_k 历元 k 的状态向量; 假设载体运动服从常速度动力学模型, 则 $\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \Delta t \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ 为

历元 $k-1$ 至历元 k 的状态转移矩阵; $\mathbf{l}_k = [\mathbf{P}^T \ \mathbf{D}^T \ \mathbf{J}^T]^T$ 为 GPS/Doppler 观测值向量, λ 为载波相位波长, \mathbf{D} 为多普勒观测向量; $\mathbf{w}_k \sim (\mathbf{0}, \Sigma_w)$, $\mathbf{e}_k \sim (\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$ 分别为状态过程噪声及观测噪声。由于 GPS/Doppler 观测方程为非线性函数, 本文采用扩展卡尔曼滤波估计状态参数^[19]。特别需要注意合理选择的观测随机模型, 即先验方差-协方差阵 \mathbf{R}_k

$$\mathbf{R}_k = \sigma_0^2(k) \mathbf{Q}_k = \sigma_0^2(k) \mathbf{P}_k^{-1} \quad (2)$$

式中, $\sigma_0^2(k)$ 为观测值在历元 k 的单位权方差因子; \mathbf{Q}_k 、 \mathbf{P}_k 分别为协因数阵与权阵。GPS/Doppler 观测信息包含了伪距观测值和多普勒频移观测值, 即观测值的方差-协方差阵为 $\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \sigma_{0p}^2(k) \mathbf{Q}_k^p & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sigma_{0d}^2(k) \mathbf{Q}_k^d \end{bmatrix}$, 其中, $\sigma_{0p}^2(k)$ 和 \mathbf{Q}_k^p 为伪距单位权方差因子及其协因数阵; $\sigma_{0d}^2(k)$ 和 \mathbf{Q}_k^d 为多普勒观测值单位权方差因子及其协因数阵。

2.2 基于 SIGMA- Δ 模型的 GPS/Doppler 方差

GPS 载噪比 C/N_0 不仅与卫星的高度角存在函数关系^[13], 且与当卫星信号在传播过程中发生反射、衍射或受到其他未知因素相关。因此, Brunner 提出了 SIGMA- Δ 模型^[12]

$$\sigma_0^2 = C_i 10^{-\frac{C/N_0 - \alpha \Delta}{10}} \quad (3)$$

式中, Δ 为模板值与实测值之间的偏差; α 为经验系数。但该模型存在一个与多路径分量相关的时间延迟, 且很难被模型化^[5]。然而式(3)是基于相位观测值所建立的, 伪距与多普勒观测值不能直接使用, 文献[7]对式(3)进行了改进

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p^2 &= a_p + b_p \times 10^{-\frac{C/N_0}{10}} \\ \sigma_d^2 &= a_d + b_d \times 10^{-\frac{C/N_0}{10}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

经验系数 a 、 b 与接收机相关, 在实际应用中应根据先验信息或者简单地采用验后估计获得。另外, 差分 GPS/Doppler 观测值的方差-协方差阵可利用式(4)根据误差传播定律导出。

2.3 相关观测值的抗差估计

C/N_0 或 SNR 模型虽然削弱了多路径效应

的影响, 但 GPS 导航精度仍然受制于粗差等未模型化的误差, 采用抗差估计可有效抑制这类误差的影响。由于差分 GPS/Doppler 观测值具有数学相关性, 本文采用 RECO (robust estimation for correlated observations)^[20] 可有效提高相关观测值的抗差能力。其主要计算方法如下: 等价权 \bar{P} 中任意元素 $\bar{p}_{ij} = \omega_j p_{ij}$, \bar{p}_{ij} 为等价权因子, $p_{ij} = \frac{1}{Q_{(i,j)}}$, $Q_{(i,j)}$ 为协因数阵的第 i 行第 j 列元素; $\omega_j = \sqrt{\alpha_j} \omega_j$ 为等价权函数。通常采用 IGG II 等价权函数

$$\omega_j = \begin{cases} 1 & |v_i| \leq k_1 \\ \frac{k_1}{|v_i|} \left(\frac{k_2 - |v_i|}{k_2 - k_1} \right) & k_1 < |v_i| \leq k_2 \\ 0 & |v_i| > k_2 \end{cases} \quad (5)$$

常量 k_1 、 k_2 的取值范围通常为 2.0~3.0、4.5~8.5; v_i 为标准化残差, 按式(6)计算^[21]

$$\tilde{v}_i = \frac{v_i}{\sigma_{MAD} \sqrt{\mathbf{Q}_{vv}(i,i)}} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{Q}_{vv} = \mathbf{Q} - \mathbf{A}_k (\mathbf{A}_k^T \mathbf{P}_k \mathbf{A}_k)^{-1} \mathbf{A}_k^T$; $\sigma_{MAD} = \alpha \cdot \text{med} |v_i - \text{med}_j |v_j||$, $i, j = 1, 2, \dots, n$, $\alpha \approx 1.483$, $\text{med} |\cdot|$ 表示取中位数; v 为 GPS/Doppler 观测值残差。

3 单位权方差因子的实时估计

卡尔曼滤波的精度和收敛性却与单位权方差因子密切相关。通常有两种途径获得 GPS 动态导航中的单位权方差因子:

(1) 预先利用大量静态数据计算获得单位权方差的先验值 σ_0^2 , 即

$$\sigma_0^2(k) \equiv \sigma_0^2 \quad (7)$$

(2) 通过当前历元的最小二乘残差估计单位权方差因子

$$\hat{\sigma}_0^2(k) = \frac{\mathbf{v}_k^T \mathbf{P}_k \mathbf{v}_k}{r_k} \quad (8)$$

式中, \mathbf{v}_k 、 \mathbf{P}_k 、 r_k 分别表示历元 k 时刻的残差向量、观测权阵以及多余观测数。以上两种方法都存在一定缺陷: 方法一忽略了动态观测环境变化引起的观测噪声的改变, 即认为单位权方差恒定; 方法二虽然考虑了观测噪声的时变性, 但由于观测信息冗余度小, 从而计算的单位权方差估值不可靠。为改善方差因子估计的可靠性, 文献[17]提出了利用多个历元的观测残差开窗估计当前历元单位权方差因子

$$\hat{\sigma}_0^2(k) = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \tau_{k-i}^T \mathbf{P}_{k-i} \mathbf{v}_{k-i}}{\sum_{i=0}^{m-1} \tau_{k-i}} \quad (9)$$

式中, m 为移动窗口宽度。但该方法存在不足, 因为利用历史信息进行平滑会掩盖当前信息的特征。因此, 本文引入时间相关的遗忘因子 ρ 和与观测冗余度相关的可靠度 τ , 将式(9)改进为

$$\bar{\sigma}_0^2(k) = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \rho_{k-i} \tau_{k-i} \hat{\sigma}_0^2(k-i)}{\sum_{i=0}^{m-1} \rho_{k-i} \tau_{k-i}} \quad (10)$$

式中, ρ, τ 的定义为

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{k-i} &= \left(\frac{m-i}{m} \right)^i \\ \tau_{k-i} &= r_{k-i} \end{aligned} \right. \quad i \in \{1, 2, 3, \dots, m\} \quad (11)$$

对于变化平缓的观测条件, 可适当加宽窗口, 而对变化的观测环境, 则缩短窗口作用范围。遗忘因子变化与移动窗口宽度的关系如图 1 所示。

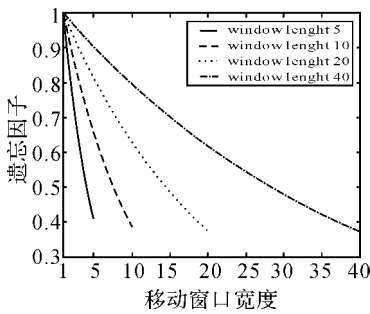


图 1 遗忘因子与移动窗口宽度的关系

Fig. 1 The relationship between forgetting factor and window length

特别地, 当 $\rho_{k-i} \equiv 1$ 时, 式(10)可退化为式(9)。若采用历元间移动平滑处理, 则式(10)可进一步改写为

$$\bar{\sigma}_0^2(k) = \frac{\tau_k \hat{\sigma}_0^2(k) + \sum_{i=1}^{m-1} \rho_{k-i} \tau_{k-i} \bar{\sigma}_0^2(k-i)}{\sum_{i=0}^{m-1} \rho_{k-i} \tau_{k-i}} \quad (12)$$

4 GPS/Doppler 导航观测值随机模型的实时估计步骤

历元 k 时刻, GPS/Doppler 导航观测值随机模型的实时估计步骤如下:

(1) 采用式(4)分别对当前历元的 GPS 和 Doppler 观测值按 SNR 确定初始权:

(2) 根据抗差估计理论迭代定权以获得 $Q(k)$;

(3) 用残差估计当前历元验后单位权方差 $\hat{\sigma}_0^2(k)$;

(4) 利用历史窗口存储的 m 个历元 $(k-i, i \in \{1, 2, 3, \dots, m\})$ 的单位权方差 $\bar{\sigma}_0^2(k-i)$ 、多余观测数 $r(k-i)$ 、 ρ_{k-i} 以及历元 k 的单位权方差验后估值 $\hat{\sigma}_0^2(k)$ 按照式(12)计算 $\bar{\sigma}_0^2(k)$, 并将得到的 $\bar{\sigma}_0^2(k)$ 、 $r(k)$ 存储到历史窗口信息中进行更新;

(5) 将当前观测信息结合与状态信息按式(2a)~(2e)进行卡尔曼滤波。

重复以上步骤 1~ 步骤 5 即可, 具体计算流程如图 2 所示。

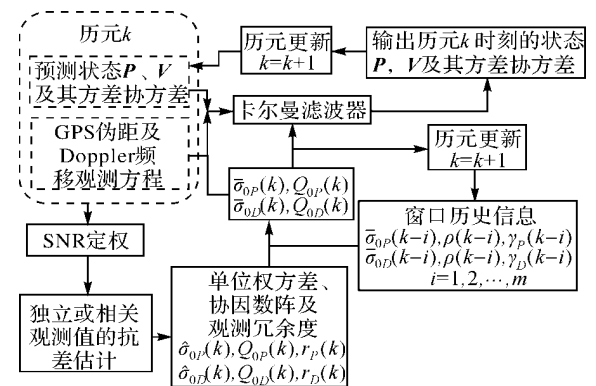


图 2 动态 GPS/Doppler 导航随机模型实时估计流程

Fig. 2 The flow chart of real time stochastic model estimation for GPS/Doppler navigation

5 实例分析

在上海市江湾附近, 使用两台 Topcon HiPer Pro 双频接收机采集车载数据, 采样率为 1 s。流动站至基准站的最长距离不超过 3 km (图 3), 持续时间大约为 1 h。在短距离差分模式下, 由于空间强相关性的误差基本得以消除, 本文实验采用 GPS 双差观测值 C/A 码, 以 Ashtech solutions 2.60 软件的双频相位解算结果作为参考值以评定本文所提出的模型精度。图 4 为各卫星其高度角与载噪比的关系, 从中不难发现: 一方面, 高度角较大 ($> 40^\circ$) 的卫星仍然易出现严重的信号衰减, 这是因为高建筑群使信号产生了衍射、反射、散射等现象而加剧了多路径效应; 另一方面, 高度角较小 ($< 40^\circ$) 的卫星同样可获得较好的信号强度。即高度角对信号强度无决定性影响, 当然也就不能真实反映多路径效应的程度。图 5 为

PDOP 与 VDOP 的分布情况, 在历元 2 000 与 3 000 左右由于卫星数的突然减少使得 PDOP 与 VDOP 发生了剧烈跳变。算例中, 初始定权方案选择载噪比模型, 状态过程噪声参照文献[21] 选取, 计算中移动窗口长度恒定取为 10 个历元(采样率为 1 s)。

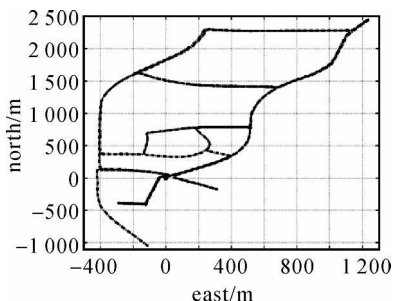


图 3 载体运动轨迹图
Fig. 3 Vehicle trajectory

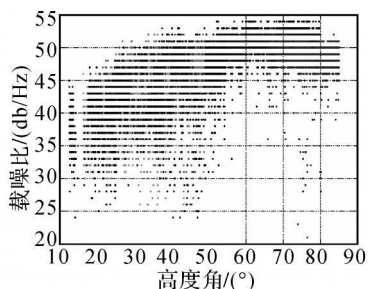


图 4 卫星高度角与载噪比的关系

Fig. 4 The relationship between satellite elevation angle and C/N₀

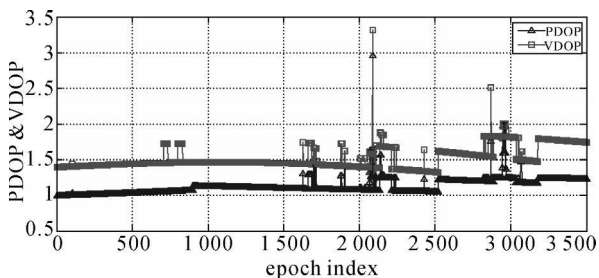


图 5 位置精度因子与速度精度因子分布
Fig. 5 PDOP and VDOP distribution

为了综合比较各种随机模型方案, 验证本文提出算法的有效性, 采用了以下 6 种方案进行计算分析。

- 方案 A: 固定先验的单位权方差因子, 式(7);
- 方案 B: 单历元验后残差估计单位权方差因子, 式(8);

- 方案 C: 非平滑移动开窗式(9);
- 方案 D: 非平滑移动开窗式(10);
- 方案 E: 平滑移动开窗式(12);
- 方案 F: 平滑移动开窗式(12) 结合抗差估计验后定权。

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 X, Y, Z 三个分量上的误差, 点位误差 $\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$ 。各方案的解算结果与参考值之间的差异见图 6, 精度统计结果见表 1。

表 1 各方案的滤波精度统计结果

Tab. 1 The precision for all schemes

精度/m	方案					
	A	B	C	D	E	F
σ_x	2.934	0.771	0.601	0.595	0.387	0.392
σ_y	2.542	0.820	0.669	0.665	0.622	0.579
σ_z	1.549	0.471	0.441	0.413	0.347	0.337
σ_p	4.180	1.220	1.002	0.984	0.811	0.776

以上图表结果表明:

(1) 方案 A 精度最差。由于方差恒定的假设太过简单, 当动态观测条件发生明显变化(如历元 1 300 以后), 不合理的先验方差导致了滤波器的不稳定。

(2) 方案 B 优于方案 A。根据当前历元残差的验后估计充分考虑了当前历元观测信息, 明显提高了精度。结合图 5, 几何图形强度减弱时(缘于观测冗余度降低), 验后残差无法真实反映其随机模型, 歪曲了观测噪声与状态噪声与对导航解的实际贡献, 降低了滤波精度。

(3) 方案 C 在方案 B 的基础上, 对当前历元的单位权方差进行了开窗平滑, 由于过分考虑了历史历元信息对当前方差估值的贡献, 只能有限地改善估计结果估计的准确性。

(4) 方案 D 在方案 C 的基础上引入了遗忘因子, 即顾及了窗口内历史信息对当前历元不同权重的影响, 更加合理平衡了窗口各历元信息对当前方差估值的贡献, 提高了精度。

(5) 方案 E 弥补了方案 D 的缺陷, 在窗口移动过程中对各点进行平滑校正后, 各历元平滑后的单位权方差也与观测环境的变化相一致, 降低了个别历元不准确的信息对后续单历元的单位权方差估值的窗口长度时间内的持续影响。

(6) 方案 F 为方案 E 与抗差估计相结合, 不仅减小了异常观测值对验后协因数阵的影响, 明

显提高利用残差估计单位权方差的准确性,而且保持了方案 E 良好的时变观测环境适应性,实时地合理估计了随机模型,精度最优。

需要强调的是,算例对移动窗口和遗忘因子的选取并非最优。理论上,若观测环境变化平缓,窗口长度可适当增加,而环境变化较快时则需要缩短窗口长度以减少过时历史观测信息对当前观

测信息的影响。算例通过车载实验数据先验的计算比较分析,选取了窗口长度为 10 个历元。遗忘因子的选取方式有很多种,如指数、对数函数等,本文只截取窗口长度内的历元进行基于指数形式的遗忘因子构造是为更好地适应动态环境,尽快降低或丢弃过失信息,而计算结果也体现出了该方法的实用性。

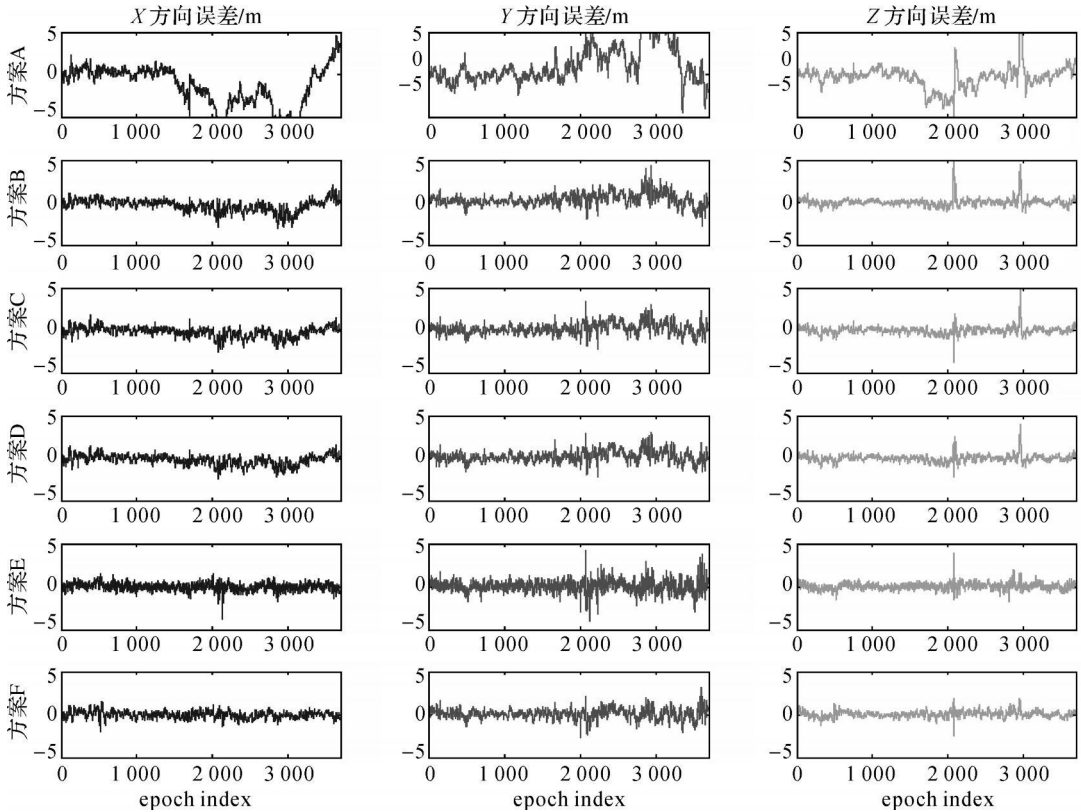


图 6 各方案解算结果与参考值之间的差

Fig.6 The differences between solutions of all schemes and referenced values

6 结论

本文主要针对 GPS/Doppler 导航中随机模型的实时估计进行深入研究,并建立一套实时的动态导航随机模型估计流程,具体涉及两个部分:一是根据载噪比模型结合基于等价权原理的验后相关观测抗差估计确定协因数阵;二是利用移动开窗方法,综合遗忘因子和观测冗余度以实现单位权方差因子的实时估计。通过实测 GPS 车载数据计算,对各种观测随机模型估计方案进行了比较分析,得出以下结论:

(1) 动态观测条件中,因伪距及多普勒测量受多路径效应影响,简单的等权或高度角加权并不能真实有效地反映多路径效应的严重程度。

(2) SNR 结合 RECO 验后定权不但可有效抑制多路径效应,还可防止粗差对权阵信息的歪曲。

(3) 动态观测环境具有时变性,先验单位权方差假设过于简单,而单历元验后估计方差因子的准确性在一定程度上受冗余观测数制约。本文提出的移动开窗法,综合考虑了遗忘因子和观测冗余度的影响,可有效实时估计单位权方差。

如何在动态时变观测环境中自适应地确定最优窗口长度、构造遗忘因子等将需要进一步地研究。

参考文献:

[1] LEICK A. GPS Satellite Surveying[M]. Hoboken: John

- Wiley, 1995.
- [2] PARKINSON BW, SPILKER J J. Global Positioning System: Theory and Applications: 1, 2 [R]. Washington, DC: American Institute of Aeronautics, 1996.
- [3] HOFMANN WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, COLLINS J. Global Positioning System: Theory and Practice: 5th ed [M]. Wien: Springer, 2001.
- [4] LAU L, MOK E. Improvement of GPS Relative Positioning Accuracy by Using SNR [J]. Journal of Surveying Engineering, 1999, 125(4): 185-202.
- [5] DAI Wujiao, DING Xiaoli, ZHU Jianjun. Robust Model Based on C/N_0 and Prior information of Parameters [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(8): 834-837. (戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军. 基于载噪比及参数先验信息的抗差模型 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(8): 834-837.)
- [6] GERDAN G P. A Comparison of Four Methods of Weighting Double difference Pseudorange Measurements [J]. Australian Surveyor, 1995, 40(4): 60-66.
- [7] KUUSNIEMI H, LACHAPPELLE G, TAKATA J H. Position and Velocity Reliability Testing in Degraded GPS Signal Environments [J]. GPS Solutions, 2004, 8: 226-237.
- [8] HUANG Jinsong, LIU Junning, LIU Chengbao, et al. On C/N_0 of Received GPS Signal [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 427-430. (黄劲松, 刘峻宁, 刘成宝, 等. GPS 信号载噪比研究 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(5): 427-430.)
- [9] TALBOT N. Optimal Weighting of GPS Carrier Phase Observations Based on the Signal to Noise Ratio [C] // Proceedings of the International Symposium on Global Positioning Systems. Queensland: [s. n.], 1988, 4: 1-17.
- [10] COMPTON C J, AXELRAD P. Adaptive SNR-based Carrier Phase Multipath Mitigation Technique [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 264-276.
- [11] BARNES B J, ACKROYD N, CROSS P A. Stochastic Modelling for Very High Precision Realtime Kinematic GPS in an Engineering Environment [C] // Proceedings of FIG XXI International Conference. Brighton: [s. n.], 1998: 61-76.
- [12] BRUNNER F K, HARTINGER H, TROYER L. GPS Signal Diffraction Modelling: The Stochastic SIGMA-D Model [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(5): 259-267.
- [13] HARTINGER H, BRUNNER F K. Variances of GPS Phase Observations: The SIGMA- ϵ Model [J]. GPS Solutions, 1999, 2(4): 35-43.
- [14] ZHOU Zebo. GPS Navigation Algorithms Based on Bayesian Theory [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (周泽波. 基于 Bayesian 估计的 GPS 动态导航算法 [D]. 上海: 同济大学, 2009.)
- [15] YANG Y, GAO W. Comparison of Adaptive Factors in Kalman Filter on Navigation Results [J]. The Journal of Navigation, 2005, 58(3): 471-478.
- [16] YANG Y, GAO W. An Optimal Adaptive Kalman Filter [J]. Journal of Geodesy, 2006, 80: 177-183.
- [17] HAN S. Quality control Issues Relating to Instantaneous Ambiguity Resolution for Realtime GPS Kinematic Positioning [J]. Journal of Geodesy, 1997, 71: 351-361.
- [18] HE Haibo, YANG Yuanxi. Realtime Estimation of a Prior Variance covariance for GPS Observations [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 42-47. (何海波, 杨元喜. GPS 观测量先验方差协方差矩阵实时估计 [J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 42-47.)
- [19] SCHWARZ K P, CANNON M E, WONG R V C. A Comparison of GPS Kinematic Models for Determination of Position and Velocity along a Trajectory [J]. Manuscripta Geodaetica, 1989, 14: 345-353.
- [20] YANG Y, SONG L, XU T. Robust Estimator for Correlated Observations Based on Bifactor Equivalent Weights [J]. Journal of Geodesy, 2002, 76: 353-358.
- [21] ZHOU Jiangwen. Classic Error Theory and Robust Estimation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1989, 18(2): 115-120. (周江文. 经典误差理论与抗差估计 [J]. 测绘学报, 1989, 18(2): 115-120.)

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2010-03-02

修回日期: 2010-06-22

第一作者简介: 周泽波(1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为 GPS 导航定位与多传感器融合导航。

First author: **ZHOU Zebo**(1982—), **male, PhD, lecturer, majors in GPS navigation and positioning, multi sensor integrated navigation.**

E-mail: **klinsmann.zhou@gmail.com**