

北斗单频相位平滑伪距精度分析

刘斌¹ 王园² 李志刚¹

(1. 西安测绘总站 陕西西安 710054; 2. 96633 部队 北京 100096)

摘要: 利用北斗/GPS 双系统接收机于 2013 年第 144 和 145 天采集两组北斗和 GPS 单频数据, 分析对应时段的 GDOP 值, 发现北斗卫星 GDOP 值在 4~6 之间, 略大于 GPS 的 GDOP。并利用单频相位平滑伪距, 分别计算各个系统平滑前后 NEU 方向的单点定位误差, 对比结果发现, 北斗的伪距单点定位经过相位平滑后精度有明显的提高, 但是需要一定的收敛时间; 而 GPS 平滑后的误差收敛很快, 但精度改进不大。

关键词: 北斗系统 单频 平滑伪距 单点定位 误差

1 引言

北斗二代卫星导航定位系统于 2012 年底实现了覆盖中国境内及周边地区的区域性导航定位能力, 为用户提供高质量的定位、导航和授时服务, 并具有短报文通信功能^[1,2]。目前北斗系统已经发射 16 颗北斗卫星, 区域卫星导航系统已经建立, 已经具备我国范围内初步三维定位和导航能力^[3]。北斗二代卫星的单点定位精度在平面方向优于 15m, 在高程方向优于 20m^[4], 伪距测量精度是影响北斗单点定位的主要因素。一般载波相位观测精度较高, 但是在载波相位观测中往往存在周跳和整周模糊度的影响, 难以直接用于单点定位。伪距观测不存在模糊度问题, 可以直接用于单点定位解算, 但伪距观测值容易受多路径效应和观测噪声的影响^[5], 难以实现较高精度的定位。为了降低伪距观测误差的影响, 提高单点定位精度, 可采用具有较高精度的载波相位平滑伪距^[6], 从而降低多路径效应和伪距观测噪声的影响。

2 单频载波相位平滑伪距的数学模型

载波相位平滑伪距时可消除相位和伪距观测值中共同的误差项, 只需要考虑观测噪声、多路径效应和电离层延迟的影响^[7]。忽略相同的改正项, 可得载波相位和伪距的观测方程为:

$$\begin{aligned} \lambda\phi &= \rho - \lambda n - I + M_\phi + \varepsilon_\phi \\ R &= \rho + I + M_R + \varepsilon_R \end{aligned} \quad (1)$$

式中, λ 为载波波长; ϕ 为载波相位观测值; R 为伪距观测值; ρ 为站星几何距离; n 为整周模糊度; I 为电离层延迟; M_ϕ, M_R 分别为载波相位和伪距的多路径效应; $\varepsilon_\phi, \varepsilon_R$ 分别为载波相位和伪距的观测噪声;

由于载波相位的多路径效应和观测噪声很小, 忽略其影响, (1) 式中的伪距观测方程与相位观测方程相减可得:

$$R - \lambda\phi = \lambda n + 2I + M_R + \varepsilon_R \quad (2)$$

考虑一定历元的观测量, 可将伪距的多路径效应和观测噪声看成随机误差, 其均值为零; 电离层折射的变化很小, 其均值可视为常数, 对式(2)两边取均值可得:

$$\lambda n + 2I = \sum_{i=1}^k (R_i - \lambda\phi_i) / k \quad (3)$$

式中, i 为历元序号; k 表示总历元数。

分析公式(3)中的第 $i-1$ 历元和第 i 历元, 由于 $\lambda n + 2I$ 为常数, 有:

$$R_{i-1} - \lambda\phi_{i-1} = R_i - \lambda\phi_i \quad (4)$$

采用加权平均法, 对式(4)两边均乘以加权系数 $1 - \omega_i$, 整理可得

$$\hat{R}_i = \omega_i R_i + (1 - \omega_i) [R_{i-1} - \lambda(\phi_{i-1} - \phi_i)] \quad (5)$$

式中, \hat{R}_{i-1}, R_i 分别是第 $i-1, i$ 历元的伪距平滑值; ω_i 为第 i 历元对应的平滑权重因子。

权重因子 ω_i 通常采用 Hatch 滤波公式^[8]计算:

$$\omega_i = 1/i \quad (6)$$

3 相位平滑伪距在北斗单点定位中的应用

采用山东北斗华宸公司开发的北斗/GPS 双系统接收机, 在北京市区某观测点接收两组北斗/GPS 单频观测数据, 采集时间分别为 2013 年第 144、145 天当地时间 3pm-4pm、9am-12am, 数据采样率为 1Hz, 卫星高度截止角为 15°, 卫星星历采用广播星历。

单点定位的误差模型需要考虑卫星钟差、接收机钟差、电离层延迟、对流层延迟等影响, 在考虑上述误差的基础上, 分别采用相位平滑和不平滑的伪距进行单点定位, 图 1~图 2 为北斗和 GPS 系统的这两天数据段时间跨度的 GDOP 值 (横坐标为历元, 纵坐标为 GDOP):

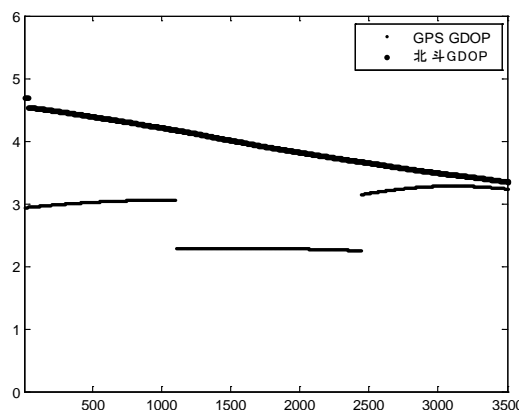


图1: DOY=144 数据段的 GDOP 分布图

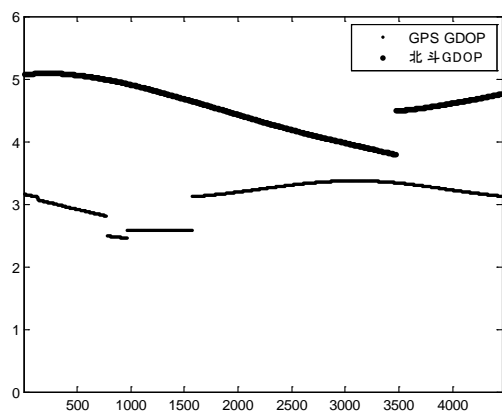


图2: DOY=145 数据段的 GDOP 分布图

从图1~2可以看出, GPS 卫星的 GDOP 值低于 4, 单点定位能力较好; 而北斗卫星的 GDOP 值在 4~6 之间, 单点定位能力一般。这主要是因为目前在轨的北斗卫星以 GEO 卫星居多, 而大量的 GEO 卫星对几何分布改进作用较小。相应的两组数据的单点定位误差分布图见图3~6, 其中图3~4为北斗定位误差分布图, 图5~6为GPS定位误差分布图(横坐标为历元, 纵坐标单位 m)。

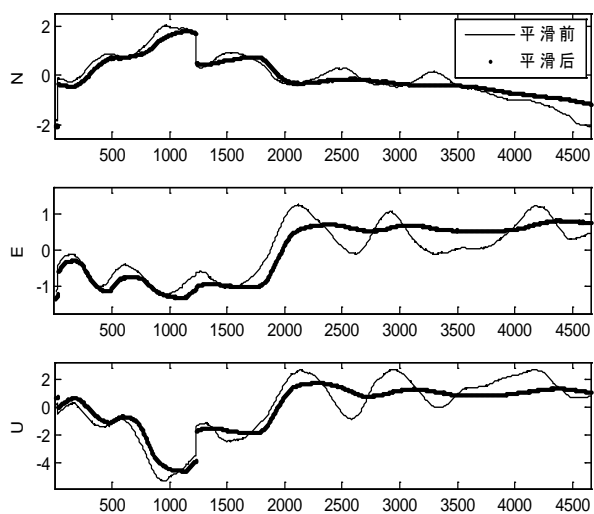


图3: DOY=144 北斗数据的单点定位误差分布图

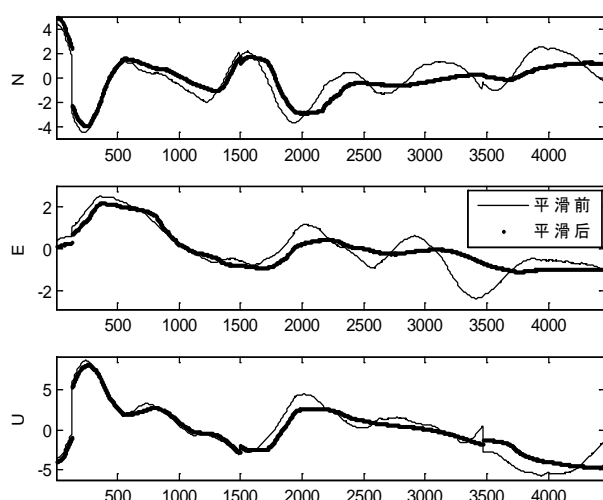


图4: DOY=145 北斗数据的单点定位误差分布图

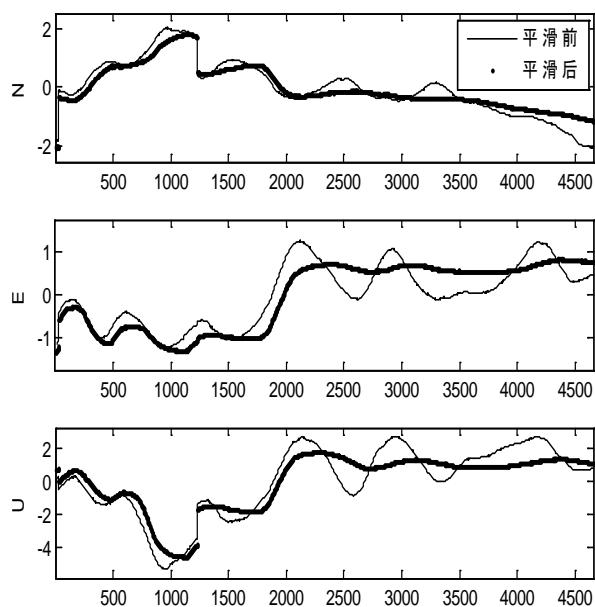


图5: DOY=144 GPS 数据的单点定位误差分布图

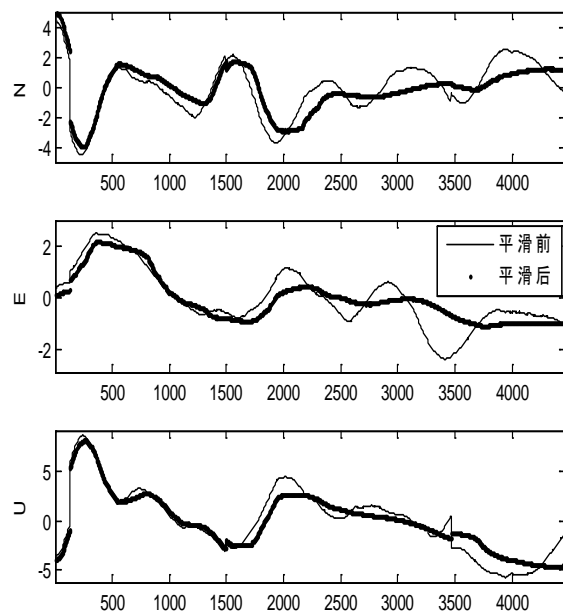


图6: DOY=145 GPS 数据的单点定位误差分布图

从图 3~6 可以看出,无论是北斗还是 GPS 系统数据经过平滑后的定位误差均有一个明显的收敛过程,随着时间的推移误差越来越小,明显优于不平滑的定位结果。从图 3~4 中大约判断从第 2500 历元开始,北斗数据平滑后的定位误差趋近于稳定结果,为了对比平滑与不平滑的定位精度,分析稳定后的单点定位误差,表 1 列出了相应的统计信息。

表 1: 北斗单点定位结果的标准差 (单位: 1σ)

DOY		N/m	E/m	U/m
144	平滑前	0.6075	0.4150	0.9774
	平滑后	0.2853	0.0948	0.1808
145	平滑前	1.1774	0.7712	2.6031
	平滑后	0.6329	0.4101	1.9921

从表 1 的统计信息可以看出,北斗系统平滑后的定位精度比平滑前有明显的提高。在平面 N 和 E 方向,提高最明显的是第 144 天的 E 方向,定位精度从 0.4150m 提高到 0.0948m,提高了 77.16%,两组数据的平均提高效果为 52.28%。在高程 U 方向,提高最明显的是第 144 天的定位结果,定位精度从 0.9774m 提高到 0.1808m,提高了 81.50%,两组数据的平均提高效果为 53.35%。整体上单频相位平滑伪距的单点定位精度在平面和高程方向可提高约 50% 左右。

表 2: GPS 单点定位结果的标准差 (单位: 1σ)

DOY		N/m	E/m	U/m
144	平滑前	0.6301	0.4188	1.1968
	平滑后	0.6296	0.2426	0.9594
145	平滑前	0.3595	0.4382	2.0015
	平滑后	0.3588	0.2991	1.9988

从图 7~9 中大约判断第 1000 历元后, GPS 数据平滑后的定位误差趋近于稳定结果,相对于北斗数

据,收敛速度较快。同样,表 2 列出了 GPS 相应的误差统计信息。

从表 2 可以看出, GPS 数据平滑后的定位精度比平滑前有一些的提高,在 144、145 天 N 方向, 145 天 U 方向改善效果却并不明显。在平面 N 和 E 方向,提高最明显的是第 144 天的 E 方向,定位精度从 0.4188m 提高到 0.2426m,提高了 42.08%,数据的平均提高效果为 18.45%。在高程 U 方向,提高最明显的是第 144 天的定位结果,定位精度从 1.1968m 提高到 0.9594m,提高了 19.84%,两组数据的平均提高效果为 13.18%。整体上单频相位平滑伪距的单点定位精度在平面和高程方向可提高约 20% 左右。

通过与 GPS 数据对比,发现北斗数据经过平滑的收敛速度慢,但收敛效果明显,精度提高在 50% 以上大于 GPS 系统的 20%,这可能主要是由于相对于 GPS 伪距,北斗伪距观测噪声大,而两个系统的载波精度相当,这样经过相位平滑伪距后,北斗的改正效果要更加明显。

4 结束语

通过北斗/GPS 双系统接收机采集的两天两组单频数据,比对 GPS 和北斗系统的 GDOP 值,并利用单频相位平滑伪距算法,分别计算各组数据平滑前后 NEU 方向的定位误差,发现平滑后的误差均明显收敛,北斗系统的伪距单点定位改正效果明显。对于单频观测数据来说,利用相位平滑伪距可以有效地提高伪距的观测精度,在单点定位中定位精度可提高 50% 以上。下一步可以采集北斗的双频观测数据,进一步分析双频相位平滑伪距的精度以及在单点定位中的应用。随着我国北斗系统的建设与不断完善,北斗的定位将更加精确有效,应用前景也非常广泛。

参考文献:

[1] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展, 贡献与挑战 [J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.
[2] 王海军, 魏冲, 祝益芳. 北斗卫星导航系统的发展与思考 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2010, 8: 105.
[3] 高星伟, 过静琨, 程鹏飞, 等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位 [J]. 测绘学报, 2012, 41(005): 743-748.
[4] 刘季, 张小红. GPS/BD 组合导航定位试验和精度分析 [J]. 测绘信息与工程, 2012, 04.
[5] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平, 等. 广域差分 GPS 原理和方法 [M]. 北京: 测绘出版社, 1999.
[6] 刘瑞华, 杨兆宁, 詹先龙. 北斗系统载波相位平滑伪距研究 [J]. 中国民航大学学报 ISTIC, 2012, 30(3).
[7] 陆亚峰, 楼立志, 马绪瀛, 等. 北斗伪距多路径分析及单点定位解算 [J]. 矿山测量, 2013, 4: 009.
[8] 何海波, 郭海荣, 李保利. 广域差分参考站两种伪距平滑算法的再评估 [J]. 测绘学院学报, 2005, 22 (3): 157-159.