

不同卫星高度角对 GPS/GLONASS/BDS/ Galileo 融合定位的影响

覃继前¹, 徐宁辉¹, 梁月吉²

(1. 南宁勘察测绘地理信息院, 南宁 530001;

2. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 研究不同卫星高度角对 GPS/GLONASS/BDS/Galileo(G+R+B+E) 融合定位的影响, 并建立了相应的模型. 采用 MGEX(Multi-GNSS Experiment) 提供的全球卫星导航系统 (GNSS) 数据, 经理论分析和算例表明: G+R+B+E 组合使得参与定位的有效卫星增多, 在不同的卫星高度角下均能保证较多的卫星数, 保证较好的空间几何分布结构; 组合系统达到一定的卫星数后, 卫星高度角对定位结果影响不大; 当卫星高度角大于 30° 时, 相对于单一的 GPS 定位 G+R+B+E 在 3D 方向的外符合定位精度有所改善.

关键词: 卫星高度角; 多系统; 卫星可见数; 位置精度衰减因子 (PDOP); 精度分析

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2021)02-0062-07

0 引 言

自第一个全球卫星导航系统 (GNSS) 运营以来, 经过了数十年的发展, 呈现了 GPS、GLONASS、北斗卫星导航系统 (BDS) 和 Galileo 融合定位的局面. Cai 等^[1]研究了 GPS/GLONASS 组合静态定位, 实验结果表明在卫星极少情况下的城市或峡谷区域, 组合单点定位精度水平方向在 20 m 左右; 王泽民等^[2]研究了 GPS、Galileo 及其组合系统导航定位的精度衰减因子 (DOP) 值, 根据模拟数据得出了双组合系统在较高卫星角下, DOP 值仍然可以满足导航定位的需要; 苏忠^[3]研究表明城市峡谷中建筑物的遮挡使得单卫星导航系统可见星数量不足, 导致无法连续定位, 采用 GPS/BDS 组合系统能够提高系统可用性, 有效地改善了伪距单点定位 (SPP) 的定位精度. 方欣颀等^[4]分析了 BDS-2/BDS-3 组合对 BDS-2、BDS-3 单系统空间几何构型、SPP 精度的改善程度. 结果表明, BDS-3 的空间几何构型较 BDS-2 有明显地提升. 可见, 多系统融合使得有效星数增加, 增强了卫星几何空间结构, 有利于进一步提高定位精度. 然而, 卫星高度角的确定在一定程度上也影响到定位精度, 对于多系统融合定位, 在达到一定的有效星数后

进一步探讨卫星高度角选取是否在一定程度上对定位精度有所改善. 因此, 本文通过建立四系统融合单点定位模型, 根据 MGEX (Multi-GNSS Experiment) 提供的实测数据, 研究不同高度角对四系统组合定位性能的影响.

1 多系统组合伪距单点定位模型

1.1 时空基准的统一

GPS 时 (GPST) 采用原子时系统 (AT), 该系统由美国 GPS 主控站的原子钟控制, 秒长与原子时的秒长相等, 但是与国际原子时 (ATI) 的原点不同, 两种相差 19 s. GLONASS 时 (GLONASST) 采用协调世界时 (UTC) 时间系统, 该系统基于 GLONASS 同步中心 (CS) 时间产生, 与俄罗斯维持的 UTC 存在 3 h 的整数差和 1 ms 内的系统差^[5]. BDS 时 (BDST) 和 GPST 一样, 采用 AT, 与 GPST 相差 14 s^[6]. Galileo 时 (GST) 与 ATI 保持同步, 两者相差约 33 ns, 因时间原点的原因, GPST 与 GST 存在一个时间偏差 GGTO (Galileo to GPS time offset)^[7]. 将 GLONASST、BDST 和 GST 转换为 GPST, 如下式:

将 GLONASST 转化为 GPST:

收稿日期: 2020-10-20

资助项目: 广西空间信息与测绘重点实验室项目 (16-380-25-22)

通信作者: 徐宁辉 E-mail: 1032271611@qq.com

$$\text{GPST} = \text{GLONASST} + 1\text{s} \times n - 19\text{s} - 3\text{h}. \quad (1)$$

式中: n 为 UTC 与 AT 之间不断调整的参数, 经国际地球自转服务组织提供

将 BDST 转化为 GPST:

$$\text{GPST} = \text{BDST} + 14\text{s}. \quad (2)$$

将 GST 转化为 GPST:

$$\text{GGTO} = A_{0G} + A_{1G} \cdot [TOW - t_{0G} + T \cdot ((WN - WN_{0G}) \bmod 64)], \quad (3)$$

$$\text{GPST} = \text{GST} + \text{GGTO}. \quad (4)$$

式中: GGTO 代表 GPS 与 Galileo 之间的系统时间偏差, 单位为 s; A_{0G} 、 A_{1G} 、 t_{0G} 和 WN_{0G} 分别代表时间偏差的常数项、变化率、参考时间和参考周数, 从 GNSS 融合导航文件获取; TOW 代表周内时间, 单位为 s; T 为常数, 等于 604 800; WN 代表 Galileo 周数; mod 代表求余函数。

$$\begin{bmatrix} X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.4 \\ -0.51 \\ -1.56 \end{bmatrix} + (1 + 22 \times 10^{-9}) \begin{bmatrix} 1 & -1.728 \times 10^{-6} & -0.017 \times 10^{-6} \\ 1.728 \times 10^{-6} & 1 & 0.017 \times 10^{-6} \\ 0.017 \times 10^{-6} & -0.017 \times 10^{-6} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{\text{R}} \\ Y_{\text{R}} \\ Z_{\text{R}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1.2 多系统融合定位模型

GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 的伪距单点定位观测方程分别为:

$$\rho_i^G = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} - cV_{\text{IR}}^G + c(V_{\text{IS}})_i - (V_{\text{ION}})_i - (V_{\text{TROP}})_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

$$\rho_j^R = \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2} - cV_{\text{IR}}^R + c(V_{\text{IS}})_j - (V_{\text{ION}})_j - (V_{\text{TROP}})_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$\rho_h^B = \sqrt{(X_h - x)^2 + (Y_h - y)^2 + (Z_h - z)^2} - cV_{\text{IR}}^B + c(V_{\text{IS}})_h - (V_{\text{ION}})_h - (V_{\text{TROP}})_h, \quad h = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$\rho_k^E = \sqrt{(X_k - x)^2 + (Y_k - y)^2 + (Z_k - z)^2} - cV_{\text{IR}}^E + c(V_{\text{IS}})_k - (V_{\text{ION}})_k - (V_{\text{TROP}})_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

式中: ρ_i^G 为的 GPS L1 频段的第 i 颗卫星伪距, 单位为 m; ρ_i^R 为接收机接收到的 GLONASS L1 频段的第 i 颗卫星伪距, 单位为 m; ρ_i^B 为接收机接收到的 BDS B1 频段第 i 颗卫星伪距, 单位为 m; ρ_i^E 为接收机接收到的 Galileo E1 频段的第 i 颗卫星伪距, 单位为 m;

GPS 采用的坐标基准是 1984 年美国大地世界坐标系统 (WGS-84); GLONASS 目前采用的是经俄罗斯进行地面网与空间网联合攻关平差后建立的 PZ90 坐标基准; BDS 采用 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000)^[8]; Galileo 采用独立的大地坐标参考系 (GTRF)^[9]. 因为伪距单点定位的精度为米级, CGCS2000 坐标系和 Galileo 坐标系转换为 WGS-84 坐标系产生的误差可以忽略不计^[9-10], 而 PZ90 坐标基准转换为 WGS-84 坐标系产生的误差则要加入计算^[11]. 本文采用布尔萨七参数模型进行 PZ90 坐标系和 WGS-84 坐标系之间的转换。考虑到建立布尔萨七参数模型需要首先确定七个转换参数, 而俄罗斯 MCC (Russian Mission Control Center) 利用全球激光跟踪轨数据计算而来的坐标转换七参数是世界公认精度最高的转换参数^[12]. 因此, 本文将 PZ90 坐标系和 WGS-84 坐标系之间的布尔萨七参数模型为

G、R、B 和 E 分别表示 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 卫星; 下标 i 、 j 、 h 和 k 分别表示 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 卫星序号; (x, y, z) 为观测坐标, 单位为 m; (X_i, Y_i, Z_i) 、 (X_j, Y_j, Z_j) 、 (X_h, Y_h, Z_h) 和 (X_k, Y_k, Z_k) 分别表示 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 卫星坐标, 单位为 m; V_{IR}^G 、 V_{IR}^R 、 V_{IR}^B 和 V_{IR}^E 分别为 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 的接收机钟差, 单位为 m; V_{IS} 表示卫星钟差, 单位为 m; V_{ION} 表示电离层延迟误差, 单位为 m; V_{TROP} 表示对流层延迟误差, 单位为 m; c 代表真空中的光速, 单位为 m。

在式 (6)~(9) 基础上, 建立三、四系统融合伪距单点定位观测方程为

$$\beta_i = \beta_i^0 + h_{xi}\Delta x_j + h_{yi}\Delta y_j + h_{zi}\Delta z_j + k_i^0 c\Delta t_j^G + k_i^1 c\Delta t_j^R + k_i^2 c\Delta t_j^B + k_i^3 c\Delta t_j^E + V_{\text{TROP}} + V_{\text{ION}} + \delta_i. \quad (10)$$

式中: $\beta_i^0 = \sqrt{(X_i - x_0)^2 + (Y_i - y_0)^2 + (Z_i - z_0)^2}$, 为第 i 颗卫星到测站之间的几何距离; (X_i, Y_i, Z_i) 为第 i 颗卫星的空间位置; (x_0, y_0, z_0) 为接收机的空间位置; β_i 为第 i 颗卫星对应的码伪距; Δx_j 、 Δy_j 和 Δz_j 为测站接收机近似坐标与真实坐标之间的差值; h_{xi} 、 h_{yi} 和 h_{zi} 分别为经过线性化后的坐标偏差系数, 其中 $h_{xi} = -\frac{X_i - x_0}{\beta_i^0}$, $h_{yi} = -\frac{Y_i - y_0}{\beta_i^0}$, $h_{zi} = -\frac{Z_i - z_0}{\beta_i^0}$; Δt_j^G 为 GPS 的卫星真实

钟差和近似钟差之间的差值; Δt_j^R 为 GLONASS 的卫星真实钟差和近似钟差之间的差值; Δt_j^B 为 BDS 的卫星真实钟差和近似钟差之间的差值; Δt_j^E 为 Galileo 的卫星真实钟差和近似钟差之间的差值; k_i^0 、 k_i^1 、 k_i^2 和 k_i^3 分别为美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、中国 BDS 和伽利略 Galileo 卫星系统的选择系数, 四个系数的取值只能是 1 或 0, 同一颗卫星, 需要将其中的 3 个系数为 0, 剩余一个系数设置为 1; V_{top} 为第 i 颗卫星对应的对流层延迟; V_{ion} 为第 i 颗卫星对应的电离层延迟; δ_i 为伪距观测值测量误差。

设某一接收机能够在某一时刻有效接收到第 m 颗卫星, 组成方程组后转化为矩阵可表示为

$$\Delta \beta = A \cdot \Delta x + \delta. \quad (11)$$

式中:

$$\Delta \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 - \beta_1^0 \\ \beta_2 - \beta_2^0 \\ \vdots \\ \beta_m - \beta_m^0 \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} h_{x1} & h_{y1} & h_{z1} & k_1^0 & k_1^1 & k_1^2 & k_1^3 \\ h_{x2} & h_{y2} & h_{z2} & k_2^0 & k_2^1 & k_2^2 & k_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{xm} & h_{ym} & h_{zm} & k_m^0 & k_m^1 & k_m^2 & k_m^3 \end{bmatrix};$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_j \\ \Delta y_j \\ \Delta z_j \\ c\Delta t_j^G \\ c\Delta t_j^R \\ c\Delta t_j^B \\ c\Delta t_j^E \end{bmatrix}; \delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_m \end{bmatrix}.$$

由伪距观测值的观测精度受观测误差的影响, 不同的伪距观测值, 其观测精度均不一样. 在进行多系统融合定位时, 需要考虑到同一个系统内、不同系统之间的权值. 因此, 可将四系统的组成方程变为

$$P\Delta \beta = PA \cdot \Delta x + P\delta. \quad (12)$$

通过最小二乘原理得

$$\Delta x = (A^T P A)^{-1} A^T P \Delta \beta. \quad (13)$$

本文主要通过卫星高度角来确定观测权值, 对于卫星高度角较大的伪距观测值, 确定的权值较大, 反之则权值较小. 文中采用文献 [12] 提出的方法, 得出如下权矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{(\sigma_1^0)^2}{\sigma_1^2} & & & 0 \\ & \frac{(\sigma_2^0)^2}{\sigma_2^2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{(\sigma_n^0)^2}{\sigma_n^2} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

式中: σ_n^0 为对应第 n 颗卫星的伪距观测值权方差; σ_n^2 为第 n 颗卫星卫星高度角函数值; σ_n^2 计算方法 [12] 如下:

$$\sigma_i^2 = \frac{a^2 + b^2}{(\sin \phi_i)^2}, \quad (15)$$

$$P_i = \frac{\sigma_{0i}^2}{\sigma_i^2}. \quad (16)$$

式中: 下标 i 分别为 G、R、B 和 E, 分别代表 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 卫星; a 和 b 代表常数, 一般取值 0.4 m 和 0.3 m; ϕ_i 代表卫星高度角; σ_{0i}^2 为某系统的伪距观测值单位权方差; P_i 为某系统的伪距观测值权值.

2 实验分析

为探讨不同卫星的截止高度角对 G+R+B+E 系统伪距单点定位的影响, 通过建立四系统定位模型, 以 2015 年第 250 周 MGEX 跟踪站中的 PTGG 测站和 GMSD 测站记录的数据为算例, 分析了卫星高度角为 10°、15°、20°、25°、30°、35° 和 40° 时 G+R+B+E 的定位性能, 并和 GPS 作对比. 经过多次实验结合经验确定 G+R+B+E 四系统伪距观测值的单位权方差比值为 4:1:3:4. 实验方案设计如表 1 所示, 其中 Klobuchar

表 1 实验方案设计

项目	GPS	GLONASS	BDS	Galileo
码伪距	C1C	C1C	C1I	C1X
原采集间隔/s	30	30	30	30
原观测长度/h	24	24	24	24
截止卫星高度角/(°)	5	5	5	5
卫星钟差改正	是	是	是	是
电离层延迟改正	Klobuchar	Klobuchar	Klobuchar	Klobuchar
对流层延迟改正	Hopfield	Hopfield	Hopfield	Hopfield
接收机钟差改正	是	是	是	是
地球自转改正	是	是	是	是
相对论效应改正	是	是	是	是
时间基准	GPST	转为GPST	转为GPST	转为GPST
坐标基准	WGS-84	转为WGS-84	否	否
卫星坐标解算	广播星历	广播星历	广播星历	广播星历

模型参数采用 <ftp://ftp.unibe.ch> 提供的电离层参数。

2.1 PDOP 值分析

图1和图2分别给出了不同卫星高度角 G+R+B+E

和 GPS 对于 PTGG 测站和 GMSD 测站的位置精度因子 (PDOP) 值变化情况。

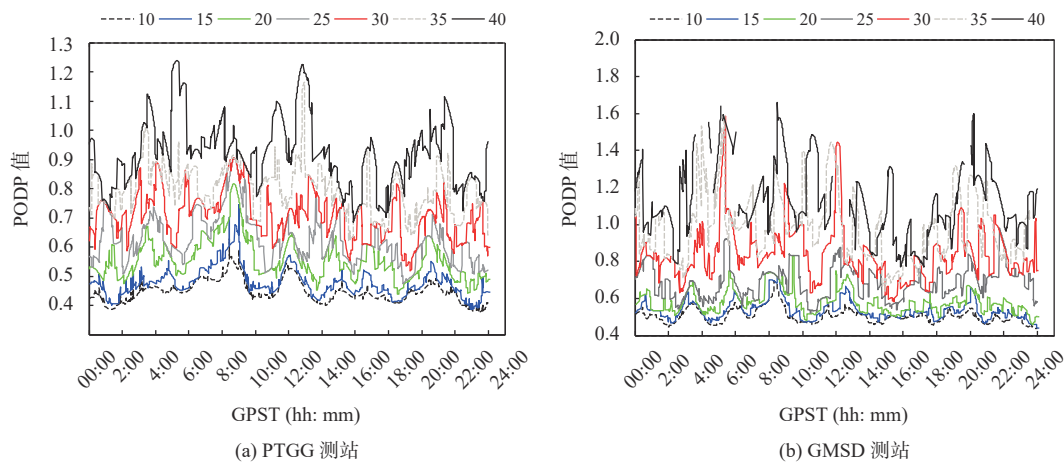


图1 不同卫星高度角 G+R+B+E PTGG 和 GMSD 测站 PDOP 值

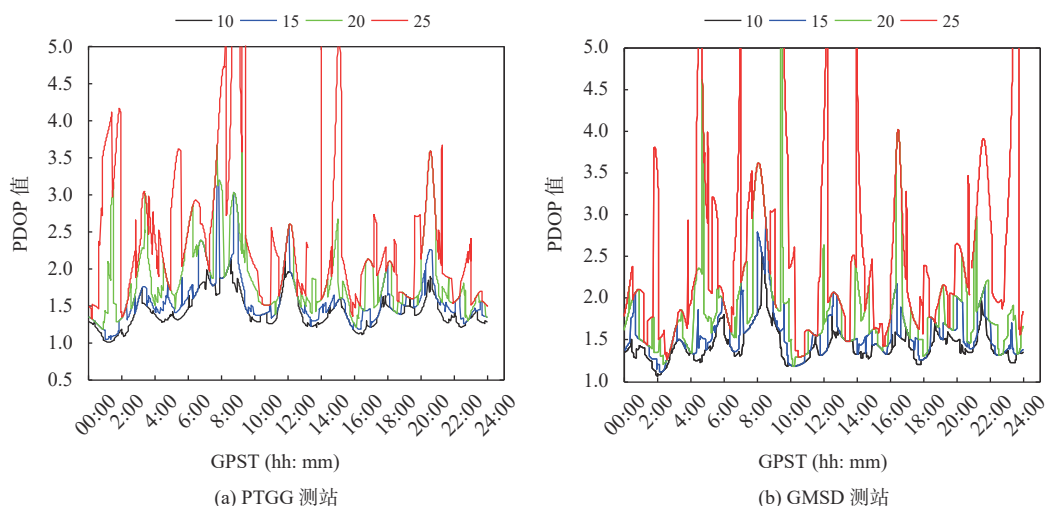


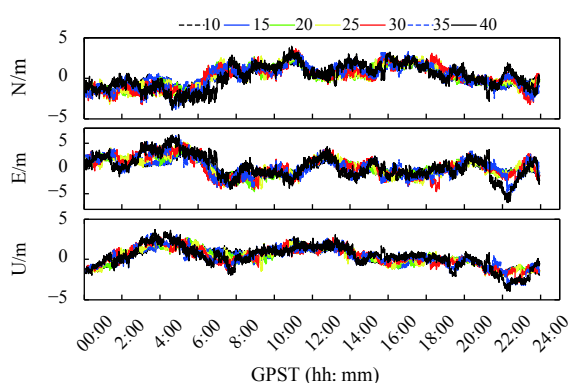
图2 不同卫星高度角 GPS PTGG 和 GMSD 测站 PDOP 值

由图2可知,随着卫星截止高度角的增大,GPS在不同时段的PDOP值变化较大,均大于1.当卫星高度角为25°时,GPS的PDOP值波动幅度更为明显,由于部分观测时段的PDOP值过大,已选择性的删除,比如PTGG测站的13:20—14:00和GMSD测站的09:10—09:40、20:40—20:55等观测时段.对比图1和图2发现,卫星高度角从10°变化到40°,G+R+B+E组合系统的PDOP值变化相对于GPS较为平缓;当卫星高度角为10°时,PDOP值多数在0.35~0.60波动;当卫星高度角截止到40°时,PDOP值多数在0.70~1.40变化.结合表2、表3进一步看出,卫星高度角为10°时,G+R+B+E组合的PDOP均值仅为0.446(PTGG测站)和0.505(MGDS测站),而GPS达到1.419和1.426,远大于G+R+B+E组合.

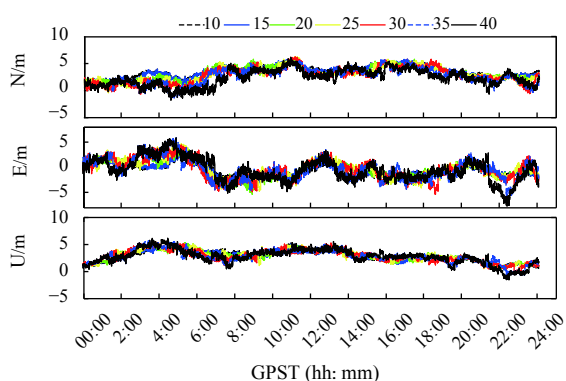
从PDOP均值变化幅度来看,当卫星高度角从10°变化到40°时,GPS的PDOP均值变化比G+R+B+E组合大;当卫星高度角为40°时,G+R+B+E组合的PDOP均值仅为0.921(PTGG测站)和1.121(MGDS测站),卫星高度角相对于10°时增加了四倍,而PDOP均值只增了一倍多.综上所述,随着卫星高度角的增加,GPS的卫星数目减少,PDOP值也相应升高;多系统融合保证了较多的可见星,PDOP值变化较为稳定.

2.2 定位精度分析

PTGG测站G+R+B+E在不同卫星截止高度角下的定位结果如图3所示,GMSD测站G+R+B+E的定位结果如图4所示,PTGG测站和GMSD测站GPS的定位结果如图5和图6所示.

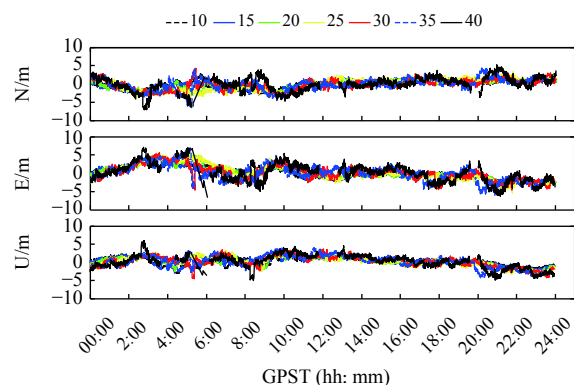


(a) G + R + B + E PTGG 测站定位结果(内符合)

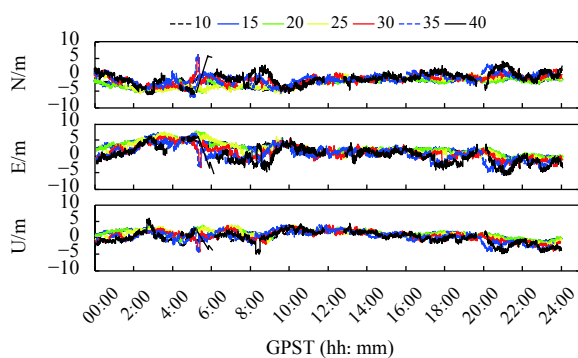


(b) G + R + B + E PTGG 测站定位结果(外符合)

图 3 不同卫星高度角 G+R+B+E PTGG 测站定位结果

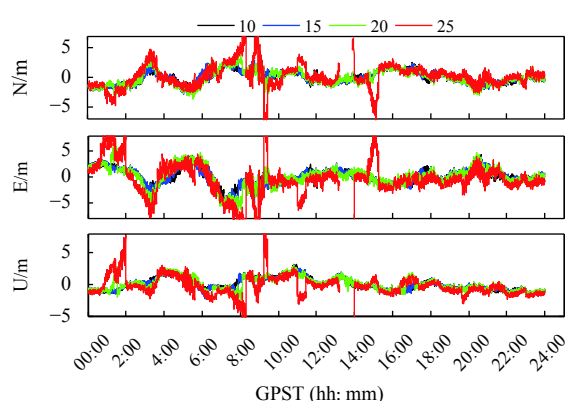


(a) G + R + B + E GMSD 测站定位结果(内符合)

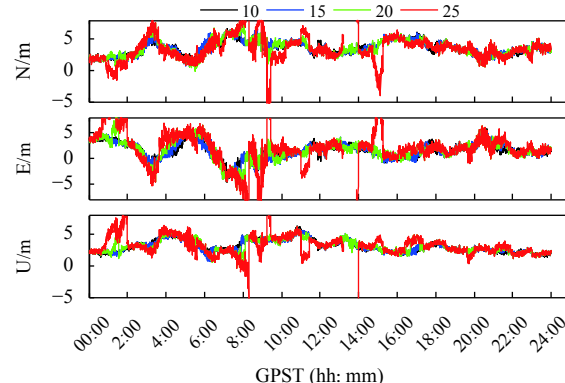


(b) G + R + B + E GMSD 测站定位结果(外符合)

图 4 不同卫星高度角 G+R+B+E GMSD 测站定位结果

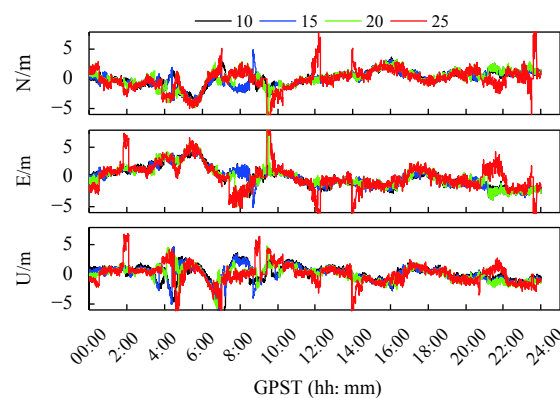


(a) 不同卫星高度角 GPS PTGG 测站定位内符合误差

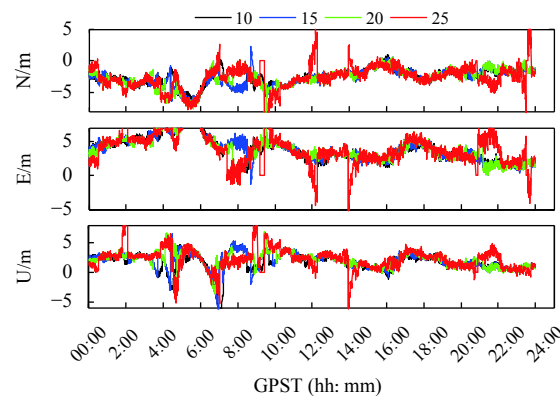


(b) 不同卫星高度角 GPS PTGG 测站定位外符合误差

图 5 不同卫星高度角 GPS PTGG 测站定位内误差



(a) 不同卫星高度角 GPS GMSD 测站定位内符合误差



(b) 不同卫星高度角 GPS GMSD 测站定位外符合误差

图 6 不同卫星高度角 GPS GMSD 测站定位内误差

由图 5 和图 6 可知,对于 GPS 不同卫星高度角下,PTGG 测站和 GMSD 测站的定位结果不稳定,当卫星高度角大于 20°时,北方向(N)、东方向(E)和天顶方向(U)的内符合和外符合残差变化幅度较明显,波动性强烈,由于部分定位结果残差较大,已被选择性地剔除.由图 3 和图 4 所示,从 G+R+B+E 融合定位的结果发现,G+R+B+E 受卫星高度角选取影响比较小,定位残差波动平缓.只有当卫星高度角大于 30°时,G+R+B+E 组合在 PTGG 测站的 21:00—24:00 观测时段和 G+R+B+E 组合在 GMSD 测站的 03:00—06:00、20:00—22:00 观测时段,定位误差大于在其他卫星高度角下的融合定位结果.

表 2、表 3 分别为 PTGG 测站和 GMSD 测站使用不同的定位系统,在不同卫星高度角下的定位精度.

表 2 不同卫星高度角下 PTGG 测站的定位精度统计											
定位系统	卫星高度角/(°)	PDOP 均值	Δ_N	Δ_E	Δ_U	W_{STD}	R_N	R_E	R_U	W_{RMS}	
GPS	10	1.419	1.071	1.547	0.980	2.121	3.717	2.186	3.271	5.413	
	15	1.566	1.158	1.730	0.991	2.306	3.766	2.313	3.257	5.490	
	20	1.861	1.271	2.014	1.047	2.602	3.776	2.627	3.309	5.667	
	25	2.587	2.193	3.485	1.765	4.481	4.043	4.014	3.607	6.743	
	10	0.446	1.019	1.276	1.084	1.960	3.683	1.437	2.959	4.939	
G+R+B+E 组合	15	0.476	1.099	1.441	1.071	2.105	3.682	1.603	2.959	4.988	
	20	0.556	1.226	1.708	1.098	2.372	3.468	1.793	3.026	4.939	
	25	0.623	1.343	1.825	1.095	2.517	3.317	1.878	3.029	4.868	
	30	0.707	1.451	2.031	1.124	2.738	3.195	2.092	2.975	4.841	
	35	0.797	1.446	2.085	1.211	2.811	3.028	2.165	2.969	4.762	
	40	0.921	1.497	2.234	1.351	3.009	2.829	2.344	2.979	4.730	

结合表 2、表 3,进一步对比分析,GPS 和 G+R+B+E 的内符合定位精度远高于外符合的定位精度,随着卫星高度角的增加,内外符合精度均有所降低,但 G+R+B+E 定位精度较为稳定,且在 N、E、U 以及 3D 方向的定位精度均优于 GPS.对比不同卫星高度角 G+R+B+E 定位的结果,发现当卫星高度角大于 30°时,G+R+B+E 在 3D 方向的外符合定位精度有所改善.综上,结合不同卫星高度角下的 PDOP 值变化分析,得出:G+R+B+E 组合使得参与定位的有效卫星增多,在不同的卫星高度角下均能保证较多的卫星数,卫星几何分布结构较强,PDOP 值变化较为稳定,

伪距单点定位的精度远优于单系统;组合系统达到一定的卫星数后,卫星高度角在一定程度上对系统的定位结果影响不大.当单系统在恶劣环境、卫星数无法满足定位的情况下,采用多系统融合确实可以提高定位精度.

表 3 不同卫星高度角下 GMSD 测站的定位精度统计表											
定位系统	卫星高度角/(°)	PDOP 均值	Δ_N	Δ_E	Δ_U	W_{STD}	R_N	R_E	R_U	W_{RMS}	
GPS	10	1.426	1.274	1.666	1.569	2.620	2.928	4.243	2.317	5.652	
	15	1.563	1.367	1.733	1.419	2.624	3.026	4.305	2.430	5.796	
	20	1.857	1.536	1.950	1.260	2.784	3.110	4.381	2.488	5.921	
	25	2.480	1.838	2.324	1.759	3.445	3.273	4.635	2.833	6.342	
	10	0.505	1.052	1.535	1.067	2.145	2.417	2.595	1.296	3.776	
G+R+B+E 组合	15	0.534	1.100	1.664	1.099	2.277	2.609	2.778	1.483	4.090	
	20	0.579	1.189	1.822	1.127	2.450	2.842	2.963	1.696	4.442	
	25	0.686	1.689	2.179	1.413	3.098	2.690	2.876	1.705	4.292	
	30	0.839	1.475	2.017	1.489	2.909	2.038	2.302	1.565	3.450	
	35	0.982	1.671	2.243	1.659	3.252	2.073	2.339	1.681	3.549	
	40	1.121	1.969	2.491	1.931	3.716	2.251	2.497	1.934	3.878	

注: Δ_N 、 Δ_E 和 Δ_U 分别代表N、E、U方向的残差, W_{STD} 代表三个方向残差值的平方和再开根号, R_N 、 R_E 和 R_U 代表N、E、U方向的均方根误差, W_{RMS} 代表三个方向均方根误差的平方和再开根号

3 结 论

本文研究了不同卫星高度角对四系统融合定位的影响,经理论分析和算例表明:卫星截止高度角增大,GPS 的 PDOP 值也变大,均大于 1.当卫星高度角为 25°时,GPS 的 PDOP 值波动幅度更为明显,不利于连续性定位解算;G+R+B+E 组合系统的 PDOP 值变化相对于 GPS 较为平缓,当卫星高度角为 10°时,PDOP 值多数在 0.35~0.60 波动;当卫星高度角为 40°时,PDOP 值多数仅在 0.7~1.4 变化;当卫星高度角超过 30°时,G+R+B+E 在 3D 方向的外符合定位精度有所改善.G+R+B+E 组合使得参与定位的有效卫星增多,在不同的卫星高度角下均能保证较多的卫星数,保证了较好的空间几何分布结构;组合系统达到一定的卫星数后,卫星高度角对定位结果影响不大.

参考文献

[1] CAI C S, GAO Y. A combined GPS/GLONASS navigation algorithm for use with limited satellite visibility[J]. [Journal of](#)

- navigation, 2009, 62(4): 671-685. DOI: [10.1017/S0373463309990154](https://doi.org/10.1017/S0373463309990154)
- [2] 王泽民, 孟浹, 伍岳, 等. GPS、Galileo及其组合系统导航定位的DOP值分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(1): 9-11.
- [3] 苏忠. 城市峡谷中GPS/BeiDou伪距单点定位性能分析[J]. 测绘通报, 2019(增刊): 30-35.
- [4] 方欣硕, 范磊. BDS-2/BDS-3伪距单点定位精度分析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(1): 19-25.
- [5] 李鹤峰, 党亚民, 秘金钟, 等. BDS与GPS、GLONASS多模融合导航定位时空统一[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(4): 73-78.
- [6] 李彬, 李征航, 刘万科. COMPASS/GPS/GLONASS系统组合在中国区域的仿真分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(6): 94-97, 102.
- [7] 赵春梅, 欧吉坤, 袁运斌. 基于单点定位模型的GALILEO及GPS-GALILEO组合系统的定位精度和可靠性的仿真分析[J]. 科学通报, 2005, 50(8): 811-819.
- [8] 邹波, 李晓莉, 陶庭叶, 等. GPS/BDS组合系统伪距单点定位模型精度分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(10): 30-32, 52.
- [9] 刘庆元, 包海, 王虎, 等. GPS、GLONASS、GALILEO三大系统间时间系统以及坐标系统的转换[J]. 测绘科学, 2008, 33(5): 13-15.
- [10] 高星伟, 过静琚, 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(5): 743-748, 755.
- [11] 党亚民, 成英燕, 薛树强. 大地坐标系及其应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- [12] GERDAN G P. A comparison of four methods of weighting double difference pseudorange measurements[J]. *The Australian surveyor*, 1995, 40(4): 60-66. DOI: [10.1080/00050334.1995.10558564](https://doi.org/10.1080/00050334.1995.10558564)

作者简介

覃继前 (1969—), 男, 工程师, 研究方向为GNSS数据处理及分析.

徐宁辉 (1983—), 男, 工程师, 研究方向为GNSS数据处理及分析.

The influence of different satellite altitude angles on GPS/GLONASS/BDS/Galileo fusion positioning

QIN Jiqian¹, XU Ninghui¹, LIANG Yueji²

(1. Nanning Surveying and Mapping Geographic Information Institute, Nanning 530001, China;
2. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: This paper studied the effects of different satellites elevation on GPS/GLONASS/BDS/Galileo (G+R+B+E) fusion positioning and corresponding model was established. Using global navigation satellite system (GNSS) data provided by MGEX(Multi-GNSS Experiment), the theoretical analysis and experiments showed that, combination of G+R+B+E increased the number of satellite used for positioning, and could ensure a relative large number of satellites and a good space geometric distribution structure. Satellites elevation had little effect on positioning result when the satellites of combined system reached a certain number. External error accuracy of G+R+B+E combination in 3D direction was improved when satellites elevation was larger than 30°.

Keywords: satellites elevation; multi-systems; the number of visible satellites; position dilution of precision (PDOP); precision analysis