引文格式：陈学彬,江勇,谢涛. 多卫星星座不同组合下的RTK定位性能评估[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 117-123. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.05.026

多卫星星座不同组合下的RTK定位性能评估

陈学彬[1]，江　勇[1]，谢　涛[2]
（1. 江苏省地质测绘院，江苏 南京 211102；2. 安徽理工大学 空间信息与测绘工程学院，安徽 淮南 232001）

摘　要：多星座定位技术已成为卫星导航领域的研究热点和发展趋势。以3组不同长度实测静态基线数据为例，对BDS-3、GPS、Galileo和GLONASS系统10种组合模式下单频和双频RTK的定位性能进行评估。结果表明，当基线不超过5 km时，多系统组合单频RTK可使模糊度固定率达到99%以上，定位精度E、N方向优于5 mm，U方向优于1.1 cm；在双频RTK解算模式下，多系统组合的定位精度优于单系统1~2 mm。当基线约为10 km且GLONASS系统不参与解算时，多系统组合解算模糊度可在30 s内固定，定位精度E、N方向优于5 mm，U方向优于3.1 cm。因此，多星座定位技术对提高卫星导航定位的精度和可靠性具有重要意义。

关键词：多星座组合；RTK算法；基线解算；性能评估
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0117-07

RTK Positioning Performance Evaluation Under Multi-constellation Different Combinations

CHEN Xuebin[1], JIANG Yong[1], XIE Tao[2]
(1. Jiangsu Geologic Surveying and Mapping Institute, Nanjing 211102, China;
2. School of Spatial Information and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Multi-constellation positioning technology has become a research hotspot and development trend in the field of satellite navigation. Taking three sets of measured static baseline data of different lengths for example, we evaluated the positioning performance of single-frequency and dual-frequency RTK under ten combined modes of BDS-3, GPS, Galileo and GLONASS. The experimental results show that when the baseline is not more than 5 km, the multi-system combination single-frequency RTK can make the ambiguity fixing rate reach more than 99%, the positioning accuracy in the E and N directions is better than 5 mm, and in the U direction is better than 1.1 cm. In the dual-frequency RTK solution mode, the positioning accuracy of multi-system combination is better than that of single system 1~2 mm. When the baseline is about 10 km and the GLONASS system is not involved in the solution, the ambiguity of multi-system combination solution can be fixed within 30 s, the positioning accuracy in the E and N directions is better than 5 mm, and in the U direction is better than 3.1 cm. Therefore, multi-constellation positioning technology is of great significance to improve the accuracy and reliability of satellite navigation positioning.

Key words: multi-constellation combination, RTK algorithm, baseline solution, performance evaluation

目前，全球导航卫星系统（GNSS）可为全球用户提供高精度、高可靠性的位置信息[1]，其中中国的BDS、美国的GPS、俄罗斯的GLONASS以及欧洲的Galileo系统可提供全球服务，日本的QZSS和印度的IRNSS可提供区域服务[2-4]。单一导航系统存在精度、可靠性和鲁棒性等方面的局限性，在实现更高水平的导航定位服务时，多系统组合定位技术可克服该局限，具有更高的精度、更强的鲁棒性、更可靠的性能和更广泛的适用范围。随着全球性和区域性卫星导航系统的不断完善，国内外众多学者[5-12]对多系统融合RTK定位技术进行了丰富的研究分析；但研究大多集中于BDS+GPS、BDS+GLONASS等双系统组合，对于三系统及以上的组合定位研究较少。基于此，本文利用3组不同长度实测静态基线数据进行BDS-3、GPS、GLONASS、Galileo系统10种组合模式下的单、双频RTK基线解算性能评估实验。

1　GNSS相对定位模型

1.1　函数模型

GNSS伪距和载波相位观测方程分别为：

$$P_{p,f}^{s}=\rho_{p}^{s}+c\delta t_{p}-c\delta t^{s}+I_{p,f}^{s}+T_{p}^{s}+\varepsilon_{p,f}^{s} \quad (1)$$

第一作者简介：陈学彬（1982—），本科，高级工程师，注册测绘师，从事地籍测量、工程测绘等相关研究管理工作，E-mail：LW_211810@163.com。

$$\lambda_f\varphi^{s}_{p,f}=\rho^{s}_{p}+c\delta t_p-c\delta t^{s}-\lambda_f N^{s}_{p,f}-I^{s}_{p,f}+T^{s}_{p}+\varepsilon^{s}_{p,f} \quad (2)$$

式中，P、φ为伪距观测值（m）和载波相位观测值（周）；ρ^{s}_{p}为接收机p相位中心与卫星s相位中心之间的几何距离（m）；λ_f为频率f下的载波波长（m）；c为光速；δt^{s}、δt_p为卫星和接收机钟差（s）；$I^{s}_{p,f}$、T^{s}_{p}为电离层和对流层延迟误差（m）；N^{s}_{p}为整周模糊度（周）；$\varepsilon^{s}_{p,f}$为包含接收机、卫星硬件延迟误差和量测噪声的其余误差（m）。

RTK定位常采用双差模型，首先在测站p_1、p_2间求差，然后在卫星s_1、s_2间求差，即可得到双差观测方程：

$$P^{s_1s_2}_{p_1p_2,f}=\rho^{s_1s_2}_{p_1p_2}+I^{s_1s_2}_{p_1p_2,f}+T^{s_1s_2}_{p_1p_2}+\varepsilon^{s_1s_2}_{p_1p_2} \quad (3)$$

$$\lambda_f\varphi^{s_1s_2}_{p_1p_2,f}=\rho^{s_1s_2}_{p_1p_2}-\lambda_f N^{s_1s_2}_{p_1p_2}-I^{s_1s_2}_{p_1p_2,f}+T^{s_1s_2}_{p_1p_2}+\varepsilon^{s_1s_2}_{p_1p_2} \quad (4)$$

式中，$P^{s_1s_2}_{p_1p_2,f}=P^{s_1}_{p_1p_2,f}-P^{s_2}_{p_1p_2,f}$；$\varphi^{s_1s_2}_{p_1p_2,f}=\varphi^{s_1}_{p_1p_2,f}-\varphi^{s_2}_{p_1p_2,f}$；其他同理。

1.2 随机模型

本文采用高度角随机模型，计算公式为：

$$\sigma^2=2\times\left(n^2+\frac{n^2}{\sin E_s}\right) \quad (5)$$

式中，σ为观测方程的量测噪声；n为量测误差因子[13]，对于伪距观测值，n=0.3，对于载波相位观测值，n=0.003[14]；E_s为卫星s的高度角。

1.3 卡尔曼滤波模型

由于最小二乘估计方法不能联系不同时刻的定位位置，因此本文采用卡尔曼滤波进行参数估计。其状态方程和观测方程分别为[15]：

$$\boldsymbol{X}_k=\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\boldsymbol{X}_{k-1}+\boldsymbol{\omega}_k \quad (6)$$

$$\boldsymbol{Z}_k=\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{X}_k+\boldsymbol{v}_k \quad (7)$$

式中，k为历元；$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$为状态转移矩阵；$\boldsymbol{\omega}_k$为动态噪声向量；$\boldsymbol{H}_k$为系数矩阵；$\boldsymbol{v}_k$为量测噪声向量。

利用卡尔曼滤波进行递推估计，包括时间更新和量测更新，主要公式为[16]：

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{X}}_{k,k-1}=\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1}\\ \boldsymbol{P}_{k,k-1}=\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}_{k,k-1}+\boldsymbol{Q}_{k-1}\\ \boldsymbol{K}_k=\boldsymbol{P}_{k,k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}_k\left(\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{P}_{k,k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}_k+\boldsymbol{R}_k\right)^{-1}\\ \hat{\boldsymbol{X}}_k=\hat{\boldsymbol{X}}_{k,k-1}+\boldsymbol{K}_k\left(\boldsymbol{Z}_k-\boldsymbol{H}_k\hat{\boldsymbol{X}}_{k,k-1}\right)\\ \boldsymbol{P}_k=\left(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}_k\right)\boldsymbol{P}_{k,k-1}\end{cases} \quad (8)$$

式中，$\boldsymbol{P}_{k,k-1}$为一步预测均方误差矩阵；$\boldsymbol{Q}_{k-1}$为系统噪声方差矩阵；$\boldsymbol{K}_k$、$\boldsymbol{R}_k$为增益矩阵和量测噪声方差矩阵；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵。

通过上述解算可得到双差模糊度浮点解，再利用LAMBDA[17]算法固定双差模糊度，估计准则见式（9），最后根据式（10）即可求得测站的固定解坐标。

$$(N-N^0)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}_N(N-N^0)=\min \quad (9)$$

$$\bar{X}=X-\boldsymbol{Q}_{XN}\boldsymbol{Q}^{-1}_N(N-N^0) \quad (10)$$

式中，N为双差模糊度浮点解；N^0为双差模糊度固定解；$\boldsymbol{Q}_N$为N的协方差矩阵；$\bar{X}$为固定解坐标；X为卡尔曼滤波解算的浮点解坐标；$\boldsymbol{Q}_{XN}$为基站坐标浮点解和双差模糊度浮点解的协方差矩阵。

2 实验数据与方案

本文利用3组实测静态基线数据进行BDS-3、GPS、GLONASS、Galileo系统10种组合模式下的单、双频RTK解算实验。由于所选数据中QZSS的有效卫星不足，解算质量差，暂不考虑。3组数据基线长度不同，采集时长和间隔均为24 h和30 s，来源于IGS站，参考坐标为IGS中心提供的数据当天的天解文件，具体信息见表1。

表1 实验数据概况

数据集	基准站	流动站	基线长度/km	采集地点	采集日期
数据一	TLSE	TLSG	1.3	法国	2023-01-01
数据二	KIR8	KIRU	4.5	瑞典	2022-01-01
数据三	STR2	TID1	9.6	澳大利亚	2023-01-01

本文分别进行单、双频RTK静态解算以及模拟动态RTK定位解算实验。截止高度角设置为15°，整周模糊度固定率设置为3.0，电离层利用Klobuchar模型改正，对流层利用Saastamoinen模型修正。系统组合方案为：GPS、GLONASS、Galileo、BDS-3、GPS+BDS-3、GLONASS+BDS-3、Galileo+BDS-3、GPS+GLONASS+BDS-3、GPS+Galileo+BDS-3、GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3。本文采用历元解算率、固定率、可用卫星平均数和均方根误差（RMSE）对各方案定位性能进行评估，其中历元解算率为有效历元数占总历元数的比例，在连续定位中解算率必须达到100%才能保证连续定位的可行性；固定率为模糊度解算获得固定解的历元数占总历元数的比例；可用卫星平均数为解算历元时实际使用的卫星数[18]。

3 RTK定位精度评估与实验分析

3.1 单频RTK定位精度评估

对各系统组合方案进行单频RTK静态基线解算实验。3组数据RTK定位可用卫星平均数和PDOP值见

表2，对于单系统，3组数据中BDS-3的可用卫星平均数最多，GPS次之，其余两个系统相差不大，而多系统组合后可用卫星平均数显著增加；对于平均PDOP值，单系统基本在2.0以上，而多系统组合在1.5以下，说明多系统组合可提供更优的卫星分布和几何结构，有助于提高定位精度。单频RTK解算定位精度和模糊度固定信息见表3~5，可以看出，对于单系统，GPS和BDS-3的可用历元数均可达到100%，GLONASS和Galileo可达85 %以上；在不同长度基线单系统解算中BDS-3和GPS的模糊度固定率总体均接近100 %，而其余系统总体较差；在模糊度均值中，BDS-3与GPS相差不大，GLONASS较小，且在GLONASS参与解算时，其模糊度固定率将有所下降，模糊度均值也较小。对于多系统组合，定位精度比单系统显著提升，且多系统组合平均可用卫星增多，进一步说明多系统组合可增加可用卫星数量、提高历元利用率，从而提升定位精度。

表2　3组数据RTK定位可用卫星平均数和PDOP值

系统组合	可用卫星平均数			平均PDOP值		
	数据一	数据二	数据三	数据一	数据二	数据三
GPS	7.60	8.27	7.76	2.2	2.6	2.3
GLONASS	6.40	6.80	6.03	4.0	2.6	3.8
Galileo	6.20	6.50	6.35	3.1	2.9	3.0
BDS-3	8.20	11.21	15.58	2.3	2.2	1.8
GPS+BDS-3	15.80	18.61	23.35	1.4	1.5	1.3
GLONASS+BDS-3	14.30	18.02	21.54	1.5	1.5	1.4
Galileo+BDS-3	14.30	18.60	21.91	1.5	1.6	1.3
GPS+GLONASS+BDS-3	22.00	26.30	29.31	1.2	1.2	1.1
GPS+Galileo+BDS-3	21.90	26.00	29.68	1.2	1.2	1.1
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	28.10	32.80	35.64	1.0	1.1	1.0

表3　单频RTK定位精度与模糊度固定信息（数据一）

系统组合	可用历元数	RMSE/m			固定率/%	均值
		N	E	U		
GPS	2 880	0.008	0.008	0.011	99.8	784.72
GLONASS	2 595	0.020	0.017	0.025	97.8	13.39
Galileo	2 735	0.030	0.006	0.041	99.4	822.79
BDS-3	2 878	0.003	0.003	0.005	100.0	746.56
GPS+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.005	100.0	434.99
GLONASS+BDS-3	2 880	0.005	0.005	0.011	99.3	14.20
Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.005	100.0	522.19
GPS+GLONASS+BDS-3	2 880	0.003	0.005	0.005	100.0	13.65
GPS+Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.005	99.4	289.71
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.005	0.005	99.4	12.98

3组数据不同系统组合下单频解算的定位误差和RMSE见图1、2，可以发现，数据一在单系统解算中

表4　单频RTK定位精度与模糊度固定信息（数据二）

系统组合	可用历元数	RMSE/m			固定率/%	均值
		N	E	U		
GPS	2 880	0.021	0.006	0.018	99.9	281.34
GLONASS	2 880	0.017	0.028	0.026	98.3	15.15
Galileo	2 879	0.005	0.005	0.008	100.0	184.71
BDS-3	2 880	0.004	0.004	0.011	100.0	279.79
GPS+BDS-3	2 880	0.004	0.003	0.008	99.9	106.22
GLONASS+BDS-3	2 880	0.003	0.004	0.007	99.9	13.43
Galileo+BDS-3	2 880	0.004	0.004	0.009	100.0	90.52
GPS+GLONASS+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.006	99.6	10.92
GPS+Galileo+BDS-3	2 880	0.004	0.003	0.007	99.9	53.42
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.006	99.0	9.83

表5　单频RTK定位精度与模糊度固定信息（数据三）

系统组合	可用历元数	RMSE/m			固定率/%	均值
		N	E	U		
GPS	2 880	0.012	0.014	0.036	100.0	73.90
GLONASS	2 763	0.012	0.015	0.031	94.9	13.64
Galileo	2 841	0.013	0.036	0.029	98.5	190.69
BDS-3	2 880	0.021	0.006	0.052	99.7	48.55
GPS+BDS-3	2 880	0.004	0.003	0.026	99.5	19.57
GLONASS+BDS-3	2 880	0.015	0.006	0.033	87.6	7.16
Galileo+BDS-3	2 880	0.012	0.004	0.031	99.5	27.01
GPS+GLONASS+BDS-3	2 880	0.011	0.007	0.032	80.9	5.49
GPS+Galileo+BDS-3	2 880	0.004	0.003	0.025	98.3	13.73
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	2 880	0.011	0.008	0.033	75.3	4.71

BDS-3的精度最高（在1 cm以内），多系统组合后其定位精度大幅提升，可达5 mm以内；数据二在单系统解算中BDS-3和Galileo的精度较好（在1 cm以内），多系统组合后精度也有显著提高，但若包含GLONASS，则U方向精度略差，与单系统相比无明显提升。在不同组合模式下数据一解算精度总体优于数据二；但数据二在GLONASS系统N方向和Galileo系统3个方向上的解算精度优于数据一。分析PDOP值可知，数据二GLONASS和Galileo的卫星几何结构表现优于数据一。数据三为10 km左右的基线，在不同组合模式下U方向解算精度无较大差异，定位精度在2~5 cm波动。对于N、E方向，多系统组合可有效提高定位精度，GPS+BDS-3和GPS+BDS-3+Galileo组合的解算精度较高（在5 mm以内）；同时U方向精度可达2.5 cm以内。

综上所述，对于超短基线单频RTK解算，多系统组合可显著提高定位精度；对于短基线，多系统组合可提高N、E方向定位精度，U方向无较大差异，定位精度在5 cm以内。多系统组合可利用多个卫星系统

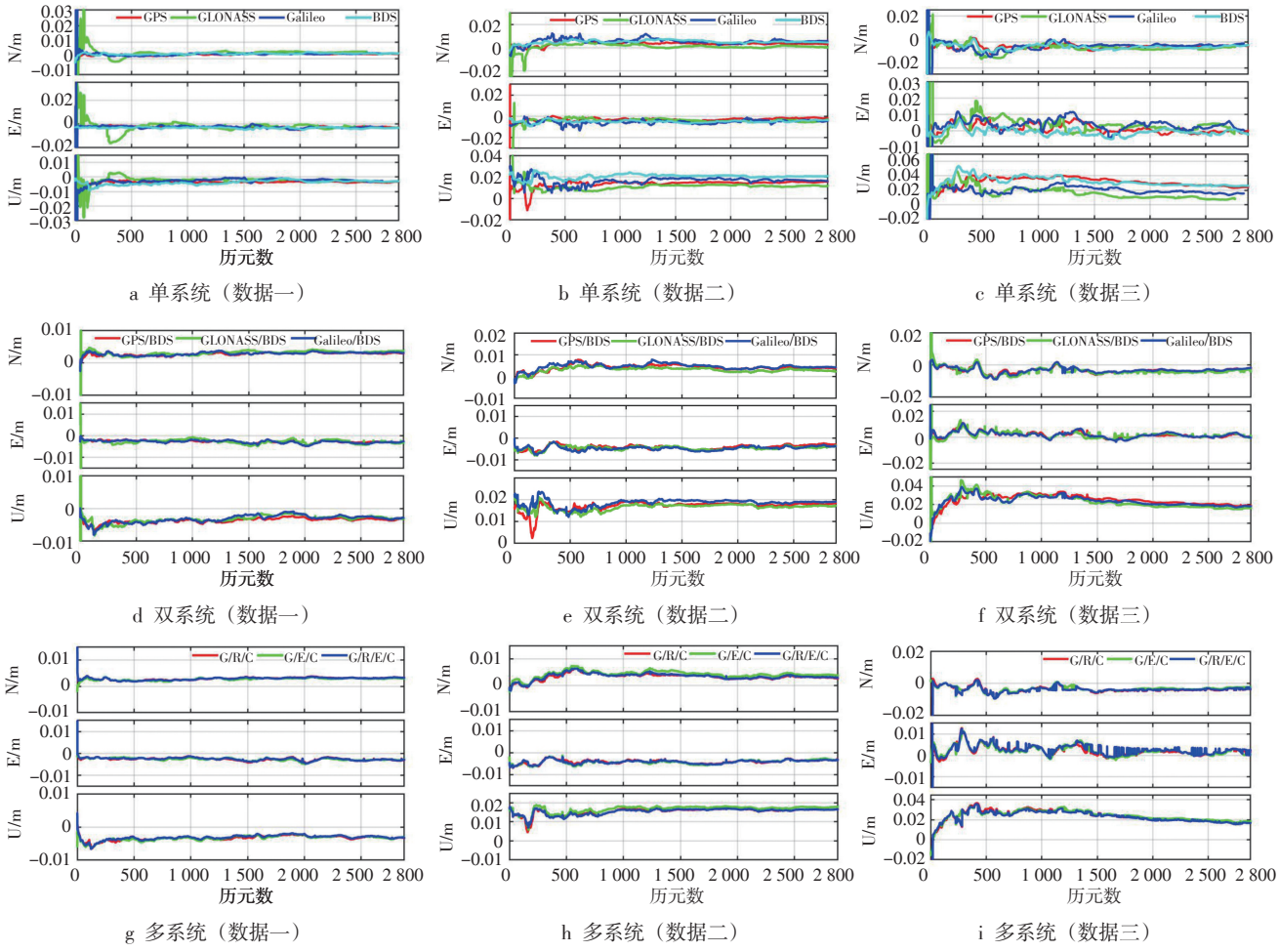


图1 3组数据不同系统组合下单频解算的定位误差

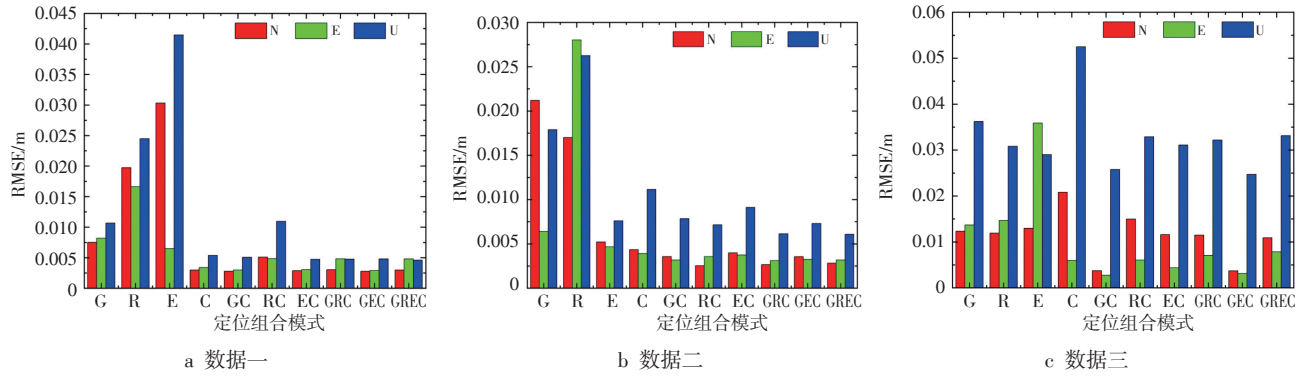


图2 3组数据不同系统组合下单频解算的RMSE

的信号，增加参与解算的卫星数量，拥有更优的卫星几何分布，使模糊度固定率略有下降时，仍能获得较好的定位精度。

3.2 双频RTK定位精度评估

对各系统组合方案进行双频RTK静态基线解算实验。3组数据的双频RTK解算定位精度和模糊度固定信息见表6~8，可以发现，GPS和BDS-3的可用历元数均可达100 %，GLONASS和Galileo可达85 %以上；单系统解算中GPS的模糊度固定率最高，BDS-3次之，GLONASS最小；模糊度均值中，BDS-3与GPS相差不大，GLONASS较小。对于多系统组合，当基线长度增加时，其模糊度固定率有所下降，且在GLONASS系统参与解算时，其固定率均值较小。不同卫星系统进行组合后平均可用卫星数量增多，可用历元达到100 %，且PDOP值比单系统小，说明多系统组合可增加有效卫星数量，拥有更优的卫星几何分布结构，提高历元利用率。

3组数据不同系统组合下双频解算的定位误差和RMSE见图3、4，可以发现，数据一在双频解算时除GLONASS和Galileo单系统的定位精度在1 cm以上，

表6　双频RTK定位精度与模糊度固定信息（数据一）

系统组合	可用历元数	RMSE/m			固定率/%	均值
		N	E	U		
GPS	2 880	0.003	0.003	0.005	100.0	565.536
GLONASS	2 595	0.015	0.010	0.016	96.6	10.758
Galileo	2 735	0.016	0.004	0.026	96.7	676.355
BDS-3	2 878	0.003	0.003	0.006	100.0	704.423
GPS+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.005	100.0	283.831
GLONASS+BDS-3	2 880	0.004	0.005	0.011	96.6	10.302
Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.005	100.0	397.861
GPS+GLONASS+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.005	100.0	9.591
GPS+Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.005	99.4	165.480
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.003	0.005	95.9	9.075

表7　双频RTK定位精度与模糊度固定信息（数据二）

系统组合	可用历元数	RMSE/m			固定率/%	均值
		N	E	U		
GPS	2 880	0.004	0.003	0.005	100.0	127.817
GLONASS	2 880	0.021	0.019	0.021	91.9	9.016
Galileo	2 879	0.005	0.005	0.008	100.0	181.735
BDS-3	2 880	0.004	0.004	0.011	100.0	235.776
GPS+BDS-3	2 880	0.004	0.004	0.006	100.0	45.677
GLONASS+BDS-3	2 880	0.010	0.005	0.015	90.3	7.644
Galileo+BDS-3	2 880	0.005	0.004	0.009	100.0	62.051
GPS+GLONASS+BDS-3	2 880	0.010	0.004	0.012	84.9	5.843
GPS+Galileo+BDS-3	2 880	0.004	0.004	0.006	99.9	24.050
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	2 880	0.009	0.005	0.014	80.3	5.214

其他组合模式均在1 cm以内；数据二的GLONASS单系统解算精度略差，各方向精度达到2 cm，其他组合模式解算精度无太大差异，E、N方向精度在1 cm以内，U方向在1.5 cm以内，解算精度最高的是GPS+BDS-3和GPS+BDS-3+Galileo组合，E、N方向精度优于4 mm，同时U方向精度优于6 mm；数据三不同组合模式U方向解算精度较差，定位精度在2.7~4 cm，N、E方向的解算精度在1.5 cm以内，在不含GLONASS的解算模式中，N、E方向精度均在5 mm以内。

3.3　模拟动态RTK定位解算

为验证模拟动态RTK定位解算性能，本文采用数据三进行模拟动态RTK解算实验。不同卫星系统组合下单、双频模拟动态RTK定位精度和模糊度固定信息见表9、10，可以发现，对于单系统，单、双频模拟GPS和BDS-3的可用历元数可达100%，GLONASS和Galileo可达85%以上，对于多系统，可用历元数均可达到100%；GPS的模糊度固定率最高，BDS-3次之；BDS-3和GPS的模糊度均值基本相当，GLONASS较小。对于单频模拟动态RTK定位，其定位精度除

表8　双频RTK定位精度与模糊度固定信息（数据三）

系统组合	可用历元数	RMSE/m			固定率/%	均值
		N	E	U		
GPS	2 880	0.003	0.005	0.032	100.0	27.712
GLONASS	2 763	0.012	0.015	0.035	89.6	10.315
Galileo	2 841	0.004	0.006	0.031	99.8	73.411
BDS-3	2 880	0.004	0.003	0.031	99.0	27.820
GPS+BDS-3	2 880	0.003	0.004	0.031	96.1	9.533
GLONASS+BDS-3	2 880	0.014	0.009	0.037	72.9	4.776
Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.004	0.029	91.8	13.445
GPS+GLONASS+BDS-3	2 880	0.011	0.006	0.039	79.3	3.354
GPS+Galileo+BDS-3	2 880	0.003	0.004	0.030	48.1	6.408
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	2 880	0.011	0.007	0.041	34.2	2.803

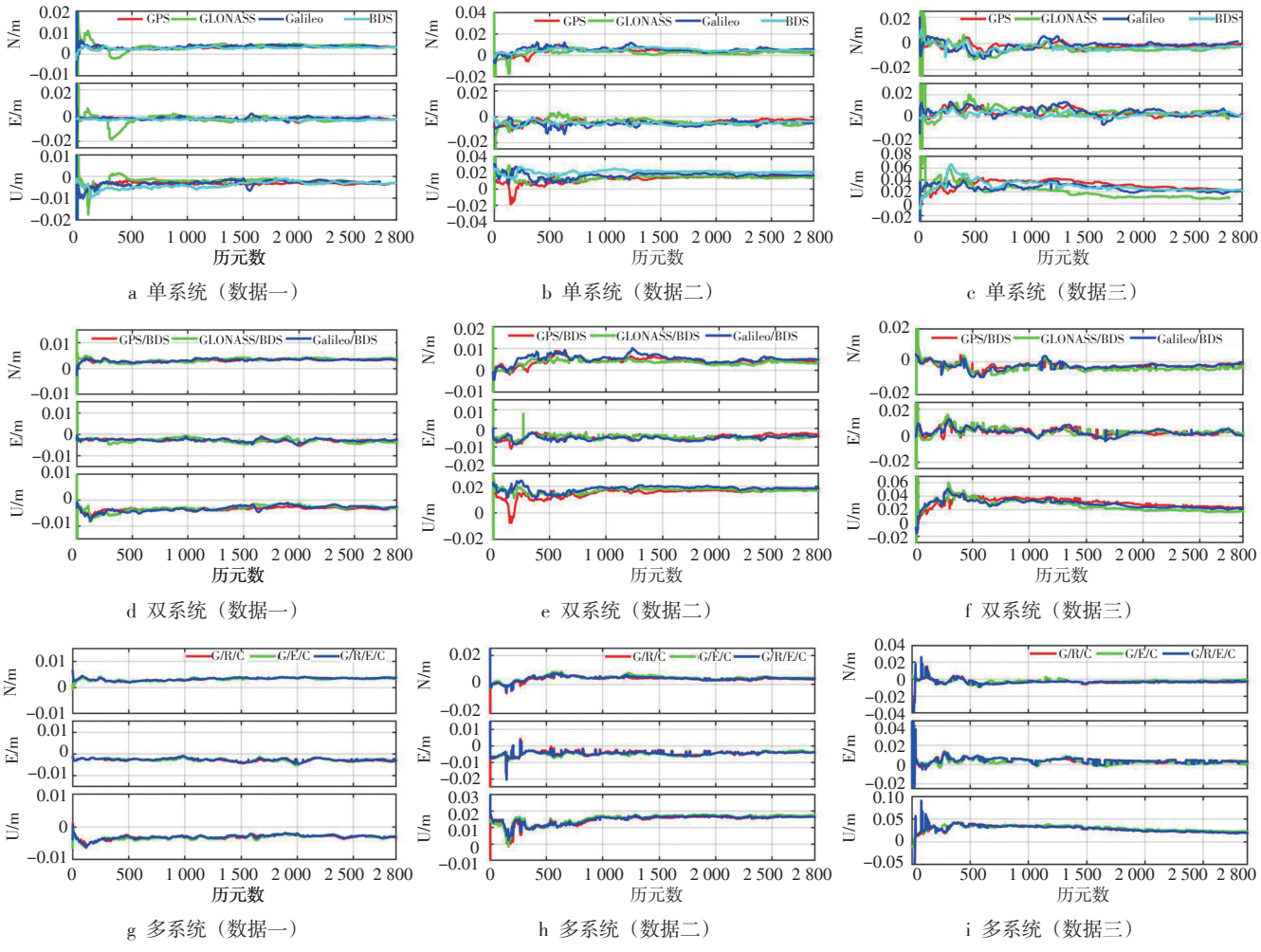
表9　单频模拟动态RTK解算定位精度与模糊度固定信息

系统组合	可用历元数	RMSE/m			固定率/%	均值
		N	E	U		
GPS	2 880	0.015	0.015	0.031	99.9	60.99
GLONASS	2 763	0.045	0.122	0.167	33.7	6.99
Galileo	2 841	0.015	0.020	0.067	97.9	150.93
BDS-3	2 880	0.022	0.009	0.042	99.8	63.52
GPS+BDS-3	2 880	0.006	0.005	0.022	99.3	29.72
GLONASS+BDS-3	2 880	0.017	0.010	0.031	87.8	7.60
Galileo+BDS-3	2 880	0.013	0.007	0.029	99.7	37.58
GPS+GLONASS+BDS-3	2 880	0.012	0.011	0.026	83.9	6.18
GPS+Galileo+BDS-3	2 880	0.006	0.006	0.021	98.1	20.73
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	2 880	0.011	0.012	0.026	81.0	5.36

GLONASS系统较差外，其他单系统在N、E方向精度优于2.2 cm，U方向优于6.7 cm，而多系统不同组合模式下U方向定位精度无较大差异，在2~3.5 cm波动，N、E方向精度在5~17 mm波动；多系统组合可有效提高定位精度，其中GPS+BDS-3和GPS+BDS-3+Galileo的解算精度最高，在N、E方向上优于6 mm，U方向上优于2.2 cm。对于双频模拟动态RTK定位，

表10　双频模拟动态RTK解算定位精度与模糊度固定信息

系统组合	可用历元数	RMSE/m			固定率/%	均值
		N	E	U		
GPS	2 880	0.011	0.008	0.031	99.9	36.485
GLONASS	2 763	0.047	0.111	0.173	52.8	5.404
Galileo	2 841	0.015	0.017	0.043	99.6	76.973
BDS-3	2 880	0.007	0.007	0.029	99.3	34.557
GPS+BDS-3	2 880	0.007	0.006	0.025	95.1	13.573
GLONASS+BDS-3	2 880	0.016	0.016	0.037	76.1	5.036
Galileo+BDS-3	2 880	0.007	0.007	0.026	97.1	16.812
GPS+GLONASS+BDS-3	2 880	0.012	0.009	0.030	58.6	3.799
GPS+Galileo+BDS-3	2 880	0.007	0.007	0.025	89.8	8.702
GPS+GLONASS+Galileo+BDS-3	2 880	0.011	0.011	0.031	45.2	3.177

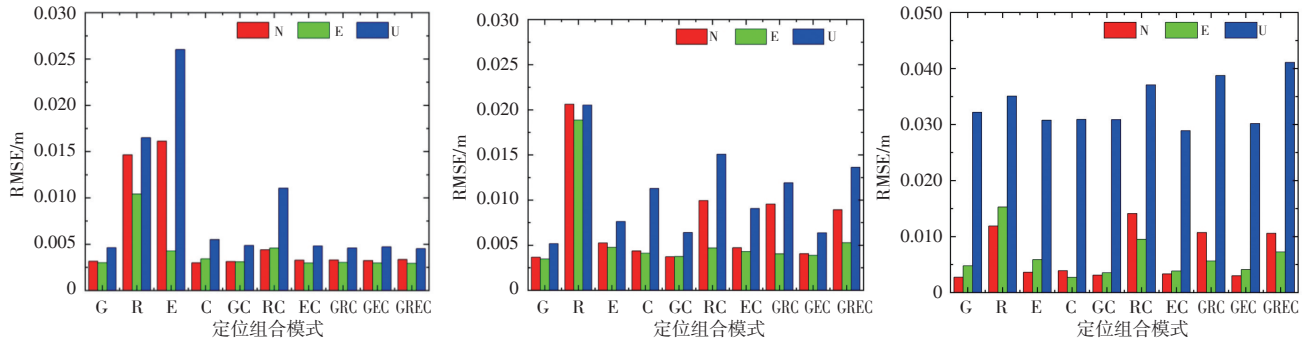


a 单系统（数据一） b 单系统（数据二） c 单系统（数据三）

d 双系统（数据一） e 双系统（数据二） f 双系统（数据三）

g 多系统（数据一） h 多系统（数据二） i 多系统（数据三）

图3 3组数据不同系统组合下双频解算的定位误差



a 数据一 b 数据二 c 数据三

图4 3组数据不同系统组合下双频解算的RMSE

其定位精度除GLONASS系统较差外，其他单系统在N、E方向上均优于1.7 cm，在U方向上均优于4.3 cm，多系统不同组合模式下U方向定位精度在2~3.7 cm波动，N、E方向在6~16 mm波动，其中GPS+BDS-3和GPS+BDS-3+Galileo解算精度最高，在N、E方向上优于7 mm，在U方向上优于2.5 cm。综上所述，单、双频模拟动态实测RTK与静态解算精度一样均可达到厘米级，说明单、双频模拟动态实测RTK解实验与静态RTK定位实验的结果具有一致性。

4 结 论

本文首先给出了相对定位模型，并介绍了RTK定位性能的评估方法和数据来源，再以模糊度固定率和均值、平均可用卫星数和有效历元以及定位精度等为评估标准，对10种系统组合模式下单、双频RTK不同长度静态基线的定位性能进行了评估，得到的主要结论为：

1）对于5 km以内的基线，在数据质量良好的情况下，单频解算时单系统解算模糊度固定率在95 %以

上，多系统在99 %以上；单系统解算中BDS-3的精度最高（在1 cm以内），多系统组合后定位精度大幅提升，可达5 mm以内，说明多系统可提升模糊度固定性能和定位性能。

2）对于双频RTK，单系统模糊度解算性能在截止高度角为15°时可达90 %以上，而多系统组合模糊度解算性能有所下降，但定位精度略优于单系统。

3）对于10 km左右的基线，无论是单频还是双频，不同组合模式的定位精度均无较大差异，精度在1~5 cm。

参考文献

[1] Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS): Achievements, Prospects and Challenges[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(7):1 671-1 697

[2] 杨元喜,许扬胤,李金龙,等. 北斗三号系统进展及性能预测:试验验证数据分析[J]. 中国科学:地球科学,2018,48(5):584-594

[3] 刘健,曹冲. 全球卫星导航系统发展现状与趋势[J]. 导航定位学报,2020,8(1):1-8

[4] 桑文刚,卢凯,宁一鹏,等. 基于Anubis多模多频GNSS数据质量检核性能验证与分析[J]. 导航定位与授时,2022,9(4):115-122

[5] 罗杰. 不同截止高度角下BDS-2/BDS-3短基线RTK定位性能分析[J]. 地理空间信息,2021,19(11):44-47

[6] He H B, Li J L, Yang Y X, et al. Performance Assessment of Single-and Dual-frequency BeiDou/GPS Single-epoch Kinematic Positioning[J]. GPS Solutions, 2014, 18(3):393-403

[7] Odolinski R, Teunissen P J G, Odijk D. First Combined COMPASS/BeiDou-2 and GPS Positioning Results in Australia.PartII:Single-andMultiple-frequencySingle-baseline RTK Positioning[J]. Journal of Spatial Science, 2014, 59(1):25-46

[8] 杜聪慧,高星伟,马元,等. BDS/GPS双系统单频RTK定位性能分析[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集:S02导航与位置服务,2018:76-81

[9] 糜晓龙,袁运斌,张宝成. BDS-3和Galileo组合的RTK定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(1):113-118

[10] 马丹,徐莹,鲁洋,等. 复杂环境下的GPS/BDS/GLONASS结合的单频RTK定位性能研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(2):253-263

[11] 汪亮,李子申,袁洪,等. BDS/GPS/GLONASS组合的双频单历元相对定位性能对比分析[J]. 科学通报,2015,60(9): 857-868

[12] Odolinski R, Teunissen P J G, Odijk D. Combined BDS, Galileo, QZSS and GPS Single-frequency RTK[J]. GPS Solutions, 2015, 19(1):151-163

[13] 边少锋,刘一,纪兵,等. 北斗三号卫星观测信息高度角相关随机模型统计特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1 615-1 624

[14] 陶振强,陈健,赵兴旺,等. 北斗三号新频点(B1C/B2a)单历元RTK定位性能分析[J]. 全球定位系统,2023,48(2):43-52

[15] 吴云,刘万科. 最优估计基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2021:128-133

[16] 秦永元,张洪钺,王叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2015:33-35

[17] Teunissen P J G. A Canonical Theory for Short GPS Baselines Part I: the Baseline Precision[J]. Journal of Geodesy, 1997, 71(6):320-336

[18] 钟海林,高睿,张宝成. 不同截止高度角BDS/GPS/Galileo单历元RTK定位性能分析[J]. 数据与计算发展前沿,2022,4(4):13-24

（上接第116页）

[9] 高银贵,周大伟,安士凯,等. 煤矿开采地表沉陷UAV-摄影测量监测技术研究[J]. 煤炭科学技术,2022,50(5):57-65

[10] 任高升,李明峰,陈宁宁,等. 无人机PPK技术支持下的河道测量与精度分析[J]. 测绘通报,2021(3):100-104

[11] 林峰,石田松,卢艳军,等. 基于激光雷达的无人机仿地飞行系统设计与实现[J]. 火力与指挥控制,2020,45(9):146-151

[12] 任智龙,李风贤,柴生亮,等. RTK和PPK融合差分技术的无人机摄影测量免像控测图精度实证[J]. 北京测绘,2022,36(9):1 225-1 230

[13] 王晶,王朝阳,张峰,等. 北斗PPK技术辅助无人机航空摄影测量精度分析[J]. 测绘通报,2022(12):64-69

[14] 于广瑞,孙国新,时春霖,等. 一种基于差分技术的无人机影像高效拼接方法[J]. 测绘科学,2020,45(10):110-118

[15] 汤伏全,芦家欣,韦书平,等. 基于无人机LiDAR的榆神矿区采煤沉陷建模方法改进[J]. 煤炭学报,2020,45(7):2 655-2 666

[16] 苗彦平,李继业,陈小绳,等. LiDAR点云的处理方法优化及其在矿区沉陷监测中的应用[J]. 煤炭技术,2021,40(10):116-119

[17] 徐辛超,李旭佳,马钰,等. 一种适合降落序列影像的快速匹配方法[J]. 遥感信息,2019,34(5):51-56

[18] 刘建坡,王宇鑫. PPK在sUAS航测中的应用及精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(8):42-47

[19] 陆燕燕,柯长青,陈德良,等. PS-InSAR在沛县矿区地表沉降监测中的应用[J]. 地理空间信息,2016,14(5):96-99

[20] 胡爽,吴文豪,龙四春,等. 分布式目标在红庆河煤矿形变监测中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(12):1 261-1 264

[21] 周悌慧,陈宇恒. 星站差分技术在无控地区的应用研究[J]. 测绘通报,2022(增刊2):68-71