

引用格式: 刘音华, 李孝辉, 刘长虹, 等. 罗兰 C 与 GNSS 组合定位系统误差校正方法的研究[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 322-330.

罗兰 C 与 GNSS 组合定位系统误差校正方法的研究

刘音华^{1,2}, 李孝辉^{1,2}, 刘长虹¹, 赵凡^{1,2}, 朱峰¹, 冯平¹

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: GNSS (Global Navigation Satellite System) 导航系统容易受电磁干扰, 且易受遮挡, 在复杂电磁环境和遮挡环境中的应用受限。罗兰 C 系统是陆基无线电导航系统, 具有发射功率大、抗电磁干扰强等优势, 可以把罗兰 C 发播台当作 GNSS 系统的伪卫星来进行组合定位, 能大大提高导航系统的可用性和可靠性。本文从理论上分析了影响组合定位性能的因素, 并提出了校正—融合的组合定位算法用以修正罗兰 C 系统误差, 并基于实测数据研究分析了北斗和罗兰 C 组合定位性能。研究表明, 基于蒲城罗兰发播台, 在 4~8 颗可用卫星资源的情况下, 采用本文提出的组合定位算法, 可以达到数十米至百米量级的定位精度; 北斗和罗兰 C 组合定位能大大优化几何精度因子; 在北斗单系统 GDOP 值越大时, 组合定位精度的改善程度也越大; 在 GDOP 小于 30 的情况下, 组合定位性能和北斗单系统相当。

关键词: 全球卫星导航系统; Loran-C; 组合定位; 精度因子; 系统误差校正

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-04-0322-09

The study of systematic error calibration method for Loran-C and GNSS integrated positioning

LIU Yin-hua^{1,2}, LI Xiao-hui^{1,2}, LIU Chang-hong¹, ZHAO Fan^{1,2}, ZHU Feng¹, FENG Ping¹

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The application of Global Navigation Satellite System (GNSS) is limited in some complicated electromagnetism environment as it may be disturbed and blocked off easily. Long Range Navigation System (Loran-C) is a kind of terrestrial radio navigation system, which has the advantages of great transmitting power and strong ability of anti electromagnetic interference. Loran-C terrestrial transmitting station can be considered as a pseudo-satellite. Thus, GNSS and Loran-C can be integrated to realize positioning, it can improve the performance of navigation systems in complicated electromagnetism environment and also can realize positioning in single system blind area. In this study, the influence factors of integrated positioning were analyzed firstly, and the positioning algorithm based on calibration and fusion was presented to correct the

systematic error of Loran-C data. Then, the performance of integrated positioning was analyzed based on the data collected from Beidou Navigation Satellite System (BDS) and Loran-C receivers. The positioning result of integrated systems was compared with the single BDS. Finally, the effect of integrated systems on geometric dilution of precision (GDOP) was studied. The results shown that based on the Pucheng Loran station, the positioning accuracy of tens or hundreds of meters can be achieved while used the proposed integration algorithm. The GDOP was improved greatly by the BDS and Loran-C systems integration; the improving effect of positioning accuracy was more obvious while the value of GDOP was greater, the performance of integrated positioning was in the same order of magnitude as BDS positioning while the GDOP value was smaller than 30.

Key words: Global Navigation Satellite System (GNSS); Loran-C; integrated positioning; dilution of precision (DOP); systematic error calibration

0 引言

GNSS (Global Navigation Satellite System) 系统是目前业界公认的高精度的星基导航系统, 但是基于 GNSS 系统的技术特征, 它们在空间区段、运行与控制区段、用户区段都可能遭受敌方干扰^[1-2]。此外, GNSS 系统具有高频段、对大建筑物绕射能力差的特点, 在大建筑物密集区域导航性能也会受到影响。因此, 需要有其他导航系统进行辅助以提高 GNSS 系统的可用性和可靠性。罗兰 C 系统与 GNSS 系统的技术特征正好互补, 罗兰 C 信号具有很强的抗干扰能力和对大建筑物的高绕射能力, 正好弥补了 GNSS 系统的不足。罗兰与 GNSS 组合定位的优势体现在 GNSS 系统受到干扰和多遮挡环境下, 罗兰发播台可以当作 GNSS 系统的伪卫星, 有效改善系统的 DOP (dilution of precision) 值, 提升系统的可用性和可靠性^[3-5]。近年来, 许多国家都在大力升级罗兰系统, 把罗兰 C 系统升级为 eLoran 系统, 也在建设差分罗兰系统, 更好地为 GNSS 系统提供辅助增强。中国也在朝这方面努力, 目前基于实测数据的研究大多都基于罗兰 C 系统, 为罗兰 C 系统的升级改造提供技术支撑和积累。

但是罗兰 C 系统定位误差在百米量级^[6-8], 传统认为罗兰 C 系统不能与 GNSS 系统进行组合定位, 否则会降低 GNSS 系统原有的定位性能。罗兰 C 系统定位误差主要包括 AF、SF 和 ASF 修正误差、发射和接收设备时延标定误差、罗兰 C 信号传播路径建模误差等等, 这些都属于系统误差。因此, 需要采取有效的方法对罗兰 C 系统进行系统误差校正, 才能实现较好的双系统组合定位精度, 从而充分利用罗兰 C 系统的优势来弥补 GNSS 系统的一些缺陷^[9-11], 增强 GNSS 系统的可用性和可靠性。

本文在分析罗兰 C 与 GNSS 系统组合定位原理的基础上, 对影响组合定位精度的原因进行了分析。提出校正—融合的组合同定位算法用以修正罗兰 C 系统误差。然后, 采集北斗接收机和罗兰 C 接收机的实测数据进行组合定位解算, 基于实际数据研究北斗和罗兰 C 组合定位性能。此外, 基于同一时段数据分析了北斗单系统定位结果, 对比研究组合定位和北斗单系统定位效果。最后, 还对比研究了北斗和罗兰 C 组合定位对几何精度因子的改善情况。

1 影响组合定位性能的因素分析

以 3 颗 GNSS 卫星和一个罗兰 C 发播台进行组合定位为例来研究组合定位数学模型。组合定位伪距观测方程如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} P_{k,k=1\sim 3} = \sqrt{(X_s^k - x_r)^2 + (Y_s^k - y_r)^2 + (Z_s^k - z_r)^2} + c \cdot \delta_r + \xi_k, \\ P_4 = a \cdot (\delta_0 + \delta_s) + c(\delta_r + \delta_{G-S}) + \xi_4 \end{cases}, \quad (1)$$

方程组 (1) 中, 第一个方程为 GNSS 伪距方程, 第二个方程为罗兰 C 系统伪距方程。 (X_s^k, Y_s^k, Z_s^k) 为第 k 颗卫星的位置坐标, P 为 GNSS 接收机和罗兰接收机的伪距观测量, δ_r 为 GNSS 接收机和 GNSS 系统时间之间的偏差, 为待求量, (x_r, y_r, z_r) 为 GNSS 接收机坐标, 也为待求量。 δ_{G-S} 为 GNSS 系统时间与罗兰 C 发播台之间的偏差, 对于溯源至 UTC 的发播台, 该偏差为一个固定的已知量。罗兰 C 接收机与 GNSS 接收机外接同源时间基准信号, $\delta_r + \delta_{G-S}$ 即为本地时间与罗兰 C 发播台之间的时差。 c 为光速, a 为参考椭球的长半轴。 δ_0 为罗兰接收机到罗兰 C 发播台之间的球面角距, δ_s 为球面角距到椭球面角距的修正量, δ_0 和 δ_s 都是关于罗兰接收机坐标的函数, 罗兰接收机与 GNSS 接收机放置在同一地点, 所以其为 (x_r, y_r, z_r) 的函数。 ξ_k 为 GNSS 观测方程的各项误差之和。 ξ_4 为罗兰 C 观测方程的各项误差之和。

从方程组 (1) 可知, 需要对误差项 ξ_k 和 ξ_4 进行修正才能获得较好的组合定位性能。图 1 分别从北斗和罗兰 C 系统出发, 分析了影响组合定位性能的主要因素。北斗系统影响组合定位的误差主要包括星历误差、电离层延迟误差、对流层延迟误差, 卫星发射通道时延校准误差和接收机噪声等等。电离层延迟误差和对流层延迟误差通过通用的电离层、对流层延迟模型就可以获得纳秒量级的校正精度^[12-13], 卫星发射通道时延校准误差也在纳秒量级^[14-15], 因此与北斗系统相关的误差对组合定位的影响可以忽略不计。

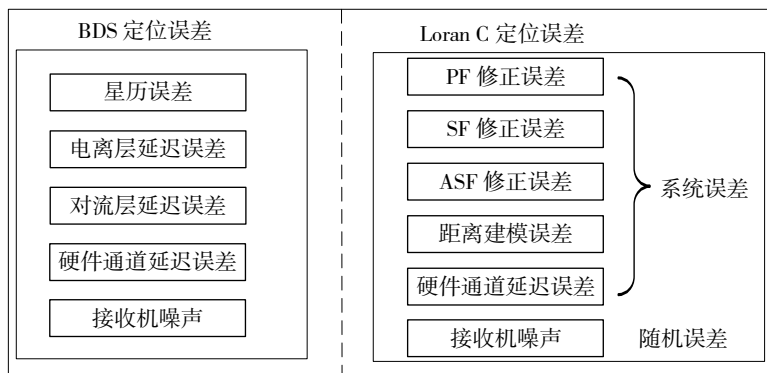


图 1 组合定位影响因素

罗兰 C 系统影响组合定位的误差主要包括 PF、SF 和 ASF 修正误差、发射和接收设备时延标定误差、罗兰 C 信号传播路径建模误差和接收机噪声等等。PF 是一次相位因子修正误差, 主要由信号在真空和在空气中传播速度差造成的, 可以通过公式进行修正^[16]。SF 是二次相位因子修正误差, 主要由信号在海水和空气中的传播速度差造成, 也可以通过公式计算^[16]。ASF 附加二次相位因子的影响是主要误差源^[17], 为实际陆地下的时延与全海水路径下的时延偏差。很多文献表明可以通过查表法进行修正, 表格的制定需要 GPS 定位接收机或其他定位设备进行事先标定, 这样既费时费力, 也会因为采样点的选取间隔导致修正精度降低。发射和接收设备时延可以标校, 但需要购买昂贵的仪器设备才能进行高精度的标校, 在普通民用设备中一般不进行设备时延的标校。罗兰 C 信号传播路径是采用椭球面进行建模的, 但是地球并不是标准的椭球体, 因此必然会引入建模误差。在实际应用过程中, PF 和 SF 公式修正后的残余误差、传播路径建模误差会被组合起来, 在 ASF 标定时统一修正, 整体修正精度在微秒量级。

因此, 影响组合定位精度的主要原因是与罗兰 C 系统相关的误差, 单 GNSS 系统定位精度已经很高, 普通伪码型接收机均能达到十米甚至米级的定位精度, 如果不采取合适的方法对罗兰 C 观测数据进行误差修正, 则会恶化组合定位性能。

PF、SF 和 ASF 修正误差、发射和接收设备时延标定误差、罗兰 C 信号传播路径建模误差等都属于系统误差, 系统误差具有重复性和可测量性。而且, 罗兰 C 地波传播时延具有较好的稳定性。因此, 只要找到合适的方法, 就能对这些系统误差进行统一修正, 这也是本文的研究重点。

2 罗兰 C 系统误差校正

既然是进行罗兰 C 与 GNSS 的组合定位, 因此可以利用 GNSS 系统较高的定位精度来标校罗兰 C 系统的系统误差, 然后再进行双系统的组合定位。本文提出校正—融合的方法来进行罗兰 C 系统误差的校正, 采用 GNSS 接收机来标校罗兰 C 系统的系统误差, 然后再进行两个导航系统数据的融合处理, 得到组合定位结果。组合定位的具体工作流程如图 2 所示。整个组合定位解算分为两个主要过程。一个是利用 GNSS 接收机进行待测点的坐标预标校的过程, 也是所谓的校准过程。在校正时采用 GNSS 单系统进行一段时间的定位, 获得 GNSS 单系统定位结果, 用该结果来修正罗兰 C 数据的系统误差。另一个是罗兰 C 系统和 GNSS 双系统数据融合定位解算的过程, 扣除系统误差的观测数据与北斗观测数据融合, 进行组合定位。组合定位坐标的求解过程是与单 GNSS 系统坐标求解过程类似, 是一个迭代过程, 直到满足一定的收敛条件。

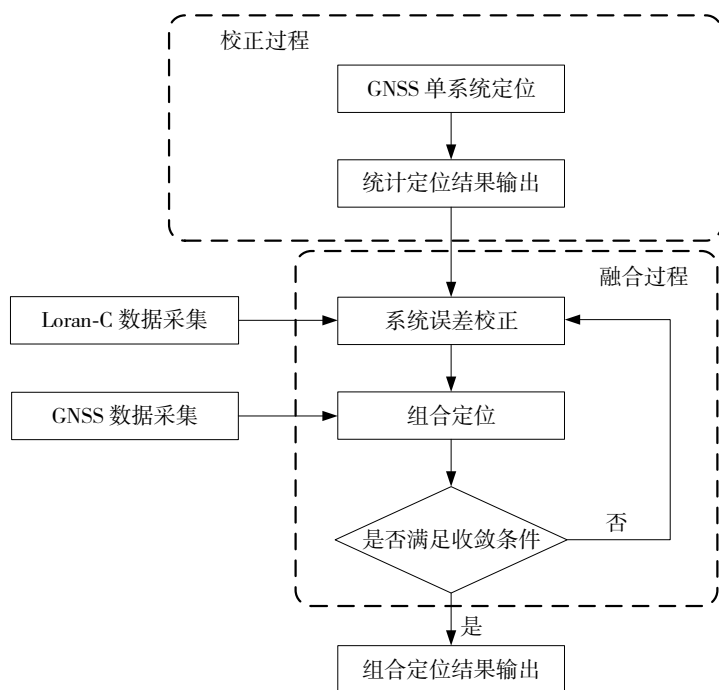


图 2 组合定位工作流程

设在校正过程中, 利用 GNSS 单系统进行定位得到的接收机坐标为 (x_{r0}, y_{r0}, z_{r0}) , 称为接收机位置标定点, 罗兰 C 发播台的坐标是已知量, 利用大圆距离公式可以求出标定点到罗兰 C 发播台的大圆距离, 设为 r_z 。在后续数据融合过程中的每次迭代计算所求得的 GNSS 接收机位置和罗兰 C 发播台的大圆距离为 r_j , j 为迭代次数, 计算 r_j 时采用的是第 $j-1$ 次迭代计算所求的接收机位置。融合计算时每次的罗兰 C 系统伪距修正量为 ρ_j , 按式 (2) 计算得到。

$$\rho_j = r_j - r_z \quad j > 1。 \quad (2)$$

设每次迭代计算接收机坐标时使用的罗兰 C 接收机伪距为 P_j , 按照式 (3) 计算得到。

$$P_j = P_{j-1} - \rho_j \quad j > 1。 \quad (3)$$

当进行第一次迭代计算时, ρ_j 按照式 (4) 计算得到。

$$\rho_1 = 0 \quad j = 1, \quad (4)$$

当 $j=1$ 时, P_0 为罗兰 C 接收机初始伪距, 即未经过任何修正的原始伪距值。

计算出每次迭代的罗兰 C 伪距 P_j 后, 将其代入式 (1) 中, 再进行罗兰 C 系统与 GNSS 系统组合定位解算, 迭代计算出新的接收机坐标用于下一轮的迭代解算, 直至计算结果满足一定的收敛条件。

从上述系统误差的修正方法可知, 在进行系统误差的修正时并不区分是哪一种系统误差, 而是把所有的系统误差进行打包处理, 统一修正。

图 3 显示了罗兰系统误差的迭代校正过程, 点 W_1 至 W_n 为每次迭代过程中解算得到的接收机坐标, W_0 为接收机位置标定点 (x_0, y_0, z_0)。基于罗兰 C 接收机初始伪距 P_0 计算出坐标 W_1 , 基于校正了系统误差的伪距 P_1 计算出坐标 W_2 。图 3 中显示了 P_1 的校正公式, 与式 (2) 和式 (3) 等价。以此类推, 可以对 P_2 至 P_{j-1} 进行系统误差校正。当迭代到一定程度, 达到设定的收敛条件, 融合解算出的接收机坐标逐渐重合, 例如图 5 中的 W_{n-2} 至 W_n 。

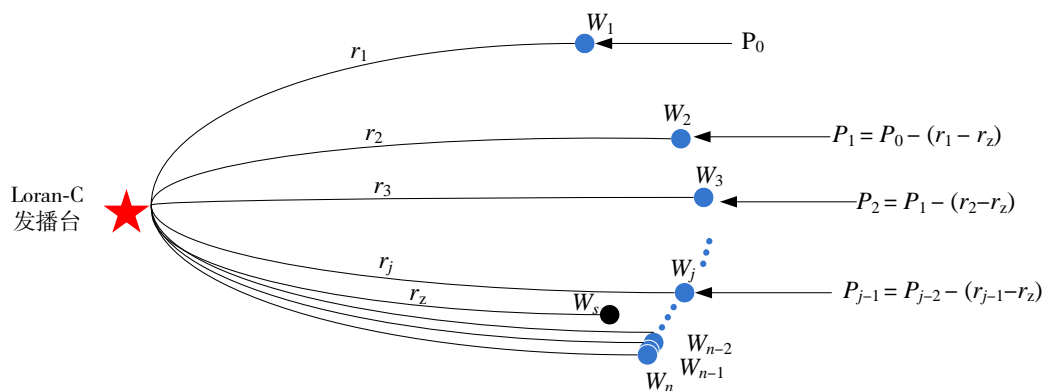


图 3 系统误差迭代校正过程

3 组合定位性能分析

本文基于西安临潼北斗接收机和罗兰 C 接收机接收蒲城罗兰 C 发播台的实测数据进行组合定位实验数据处理与分析, 首先就双系统组合定位对几何精度因子的改善情况进行研究, 然后进行双系统组合定位实验, 分析组合定位性能, 并与北斗单系统定位性能进行对比。

为了方便下文进行描述, 对本文具体开展的实验项目进行编号, 见表 1 所示。编号为 S1 至 S7 的实验为北斗单系统定位实验, 字母 S 表示北斗单系统定位分析; 编号为 I1 至 I7 的实验为双系统组合定位实验, 字母 I 表示组合定位分析。表 1 中, 1~5 号星为 GEO 卫星, 6、8、9 号星为 IGSO 卫星。实验数据时长为 1 h, 数据间隔为 1 s, 组合定位时前半小时的数据用于校正系统误差, 后半小时的数据用于评估组合定位效果。

表 1 组合定位实验项目编号与星地资源对应关系

编号	星地资源组合情况	编号	星地资源组合情况
S1	1~6、8、9 号星	I1	1~6、8、9 号星+1 罗兰台
S2	1~6、8 号星	I2	1~6、8 号星+1 罗兰台
S3	1~6 号星	I3	1~6 号星+1 罗兰台
S4	1~5 号星	I4	1~5 号星+1 罗兰台
S5	1~4 号星	I5	1~4 号星+1 罗兰台

续表 1

编号	星地资源组合情况	编号	星地资源组合情况
S6	1~3、8 号星	16	1~3、8 号星+1 罗兰台
S7	1~3、9 号星	17	1~3、9 号星+1 罗兰台

3.1 几何精度因子分析

卫星导航系统的定位精度一方面由用户等效距离误差 (UERE) 决定, 另一方面由卫星星座的几何布局决定, 几何精度因子 (geometric dilution of precision, GDOP) 是衡量卫星星座几何布局优劣的一个物理量^[8-9]。因此, 本文比较了组合定位和北斗单系统定位的几何精度因子, 表 2 为临潼 GDOP、PDOP (position dilution of precision) 和 TDOP (time dilution of precision) 的计算结果, 表中的各个实验编号与表 1 对应。

表 2 几何精度因子分析

编号	GDOP			PDOP			TDOP		
	S	I	改善程度/%	S	I	改善程度/%	S	I	改善程度/%
1	3.198	1.777	44.43	2.685	1.665	37.99	1.737	0.617	64.48
2	3.28	1.9	42.07	2.775	1.8	35.14	1.744	0.7	59.86
6	9.7	2.8	71.13	7.7	2.5	67.53	6	1.2	80.00
7	10.5	4.6	56.19	8.3	4.5	45.78	6.3	1	84.13
3	25.009	8.5	66.01	24.807	8.5	65.74	2.866	1	65.11
4	63.98	12.5	80.46	63.78	12.4	80.56	5.026	1.1	78.11
5	66.6	19.8	70.27	66.3	19.7	70.29	6.5	1.7	73.85

从表 2 可以看出, 北斗和罗兰 C 组合定位能优化几何精度因子, 各项 DOP 值较北斗单系统均大大减少。将表 2 中组合定位 DOP 值相对于北斗单系统 DOP 值的改善量换算为百分比, 得到相应的改善程度, 如表 2 中“改善程度”列所示。从改善程度可以看出, 组合定位对几何精度因子 (GDOP)、位置精度因子 (PDOP) 和时间精度因子 (TDOP) 均有大程度的改善, 最大的改善程度达到 80%, 最小的改善程度也有 37%。从表 2 可以进一步发现, 在北斗单系统 DOP 值越大时, 双系统组合 DOP 值的改善程度相对来说也较大, 对位置精度因子 (PDOP) 和时间精度因子 (TDOP) 均是如此。由此可见, 引入一个罗兰 C 地面发播台, 可以大大改善星座的几何精度因子, 对于星座几何分布本身欠佳的情况, 改善尤为突出。

3.2 组合定位效果分析

采集北斗接收机的双频伪码观测量和罗兰接收机的观测数据, 按照表 1 的实验项目分别进行双系统组合定位和北斗单系统定位解算, 分析定位误差。

图 4 (a) 为实验项目 I1 的定位误差图, 为 8 颗北斗卫星和蒲城罗兰发播台组合定位结果。从图上可知, 1~6、8、9 号星和蒲城罗兰发播台组合定位误差小于 20 m。图 4 (b) 为实验 S1 的定位误差图, 仅为北斗单系统的定位结果, 定位误差也小于 20 m, 与双系统组合定位精度相当。各个维度的定位误差统计结果见表 3 所示, 组合定位在 X 轴上大约有 3 m 的定位精度改善; 但在 Y 轴上, 组合定位性能有所恶化, 定位误差大约增加了 2.4 m; 总的位置误差方面, 组合定位和北斗单系统相差不大, 仅为 0.3 m。

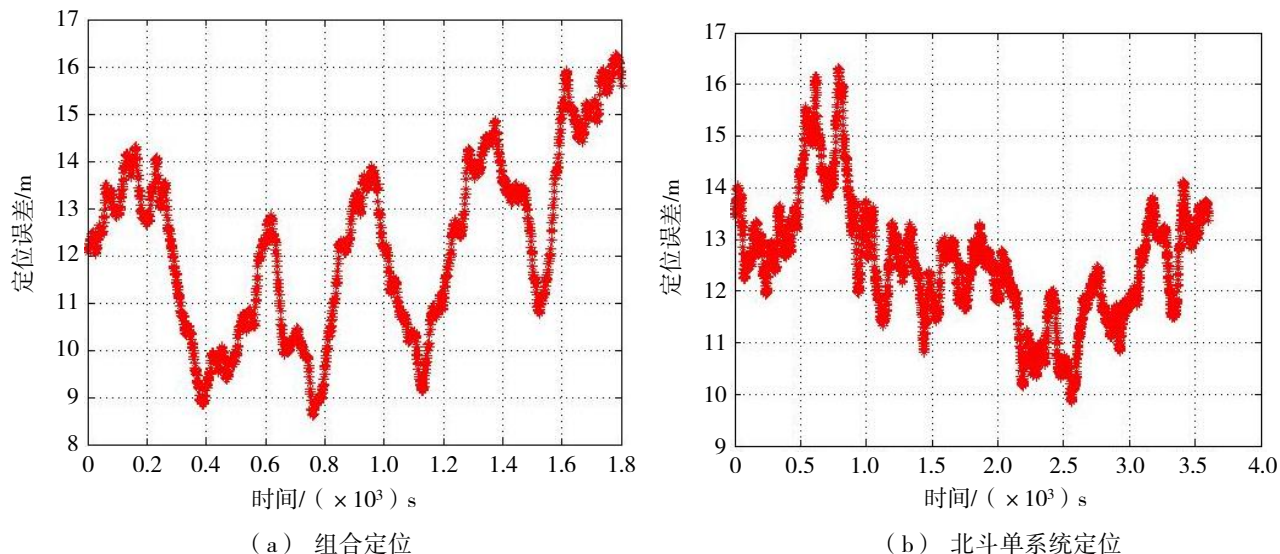


图 4 实验 II 与 S1 定位误差对比

图 5 (a) 和 (b) 分别为实验项目 I2 和 S2 的定位误差图, 在图 4 实验的基础上去掉了 9 号星。从图 5 可知, 1~6、8 号星和蒲城罗兰发播台组合定位误差也在 20 m 以内, 与北斗单系统的定位精度大致相当。从表 3 定位误差统计结果可以看出, 在 X 轴和 Y 轴上, 组合定位误差均小于北斗单系统定位, 总的定位误差减少了 1.8 m。粗略对比图 4 和图 5, 发现在去掉了 9 号星的情况下, 不论是组合定位还是北斗单系统定位, 定位精度并没有明显的恶化。经过分析发现, 一方面是由于 9 号星在此数据时段高度角偏低, 观测数据质量有所下降。另一方面是因为 9 号星对几何精度因子的改善并不明显, 表 2 的 DOP 值分析结果即可说明, 去掉 9 号星前后的 DOP 值相差不大。

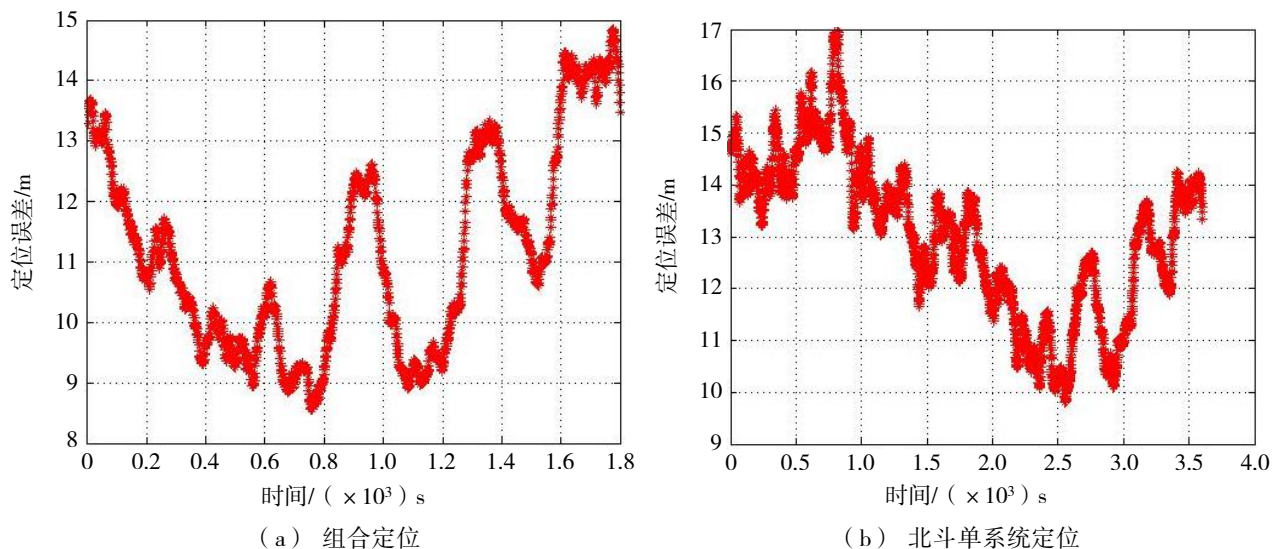


图 5 实验 I2 与 S2 定位误差对比

图 6 (a) 和 (b) 分别为实验项目 I6 和 S6 的定位误差图, 采用了 1~3 号星和 8 号星的观测数据。从图 6 可知, 此时, 组合定位误差在 30 m 以内, 与北斗单系统的定位精度大致相当。结合表 3 定位误差统计结果可知, 在 X 轴、Y 轴和 Z 轴上, 组合定位误差均小于北斗单系统定位, 总的定位精度提升了 2.7 m。结合表 2 的 TOP 值分析结果, 发现 1~3 号星和 8 号星组合时的 DOP 值明显优于其他 8 号星缺失的情况, 即使可用卫星数目更多。可见, 在此时的观测时段内, 8 号星是北斗系统的一颗关键卫星, 对良好的星座几何结构构建至关重要。

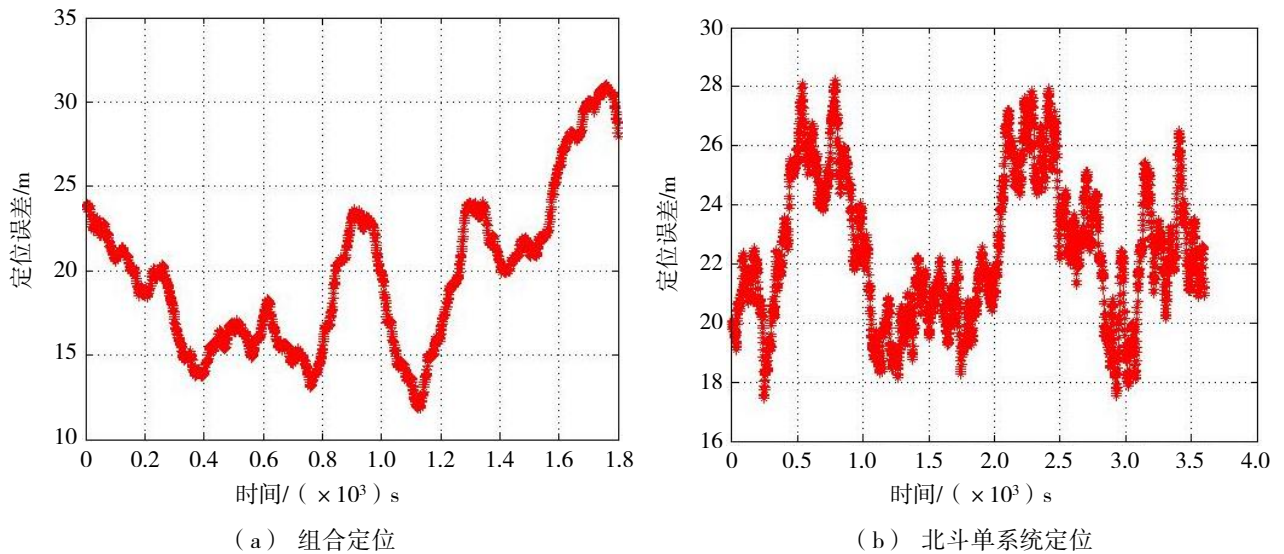


图 6 实验 I6 与 S6 定位误差对比

对上述组合定位与北斗单系统定位的定位误差进行统计计算，汇总于表 3 中。表中， ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 和 ΔD 分别为 X 轴、Y 轴和 Z 轴误差和距离误差，S-I 列数据是组合定位与北斗单系统定位误差的偏差。

结合表 3 的统计数据可知，在现有蒲城罗兰发播台资源的基础上采用本文提出的校正—融合算法可以达到数十米至百米量级的组合定位精度。实验 4 和实验 5 定位精度最低，组合定位与北斗单系统定位的定位误差统计值均在百米量级。这是由于这两个实验几何精度因子较高，北斗单系统的 PDOP 值在 60 以上，组合定位的 PDOP 值也在 10 以上。除了实验 3 与实验 7，组合定位均能减少一定程度的定位误差，实验 4 和实验 5 定位精度提升最多，达到 20~30 m。实验 3 与实验 7，尽管组合定位的几何精度因子较北斗单系统有较大优化，但北斗单系统本身的定位精度在 20~30 m 范围，而罗兰 C 观测数据本身的随机噪声也在几十纳秒量级，如果不对罗兰观测数据进行降噪预处理，组合定位性能可提升的空间并不大。

表 3 组合定位与北斗单系统定位误差对比

单位：m

编号	ΔX			ΔY			ΔZ			ΔD		
	S	I	S-I	S	I	S-I	S	I	S-I	S	I	S-I
1	7.2	4.2	3.0	5.1	7.5	-2.4	8.4	8.4	0.0	12.5	12.2	0.3
2	7.2	5.4	1.8	5.1	5.0	0.1	9.1	8.0	1.1	13.0	11.2	1.8
3	6.9	8.1	-1.2	5.3	-2.0	7.3	28.3	35.1	-6.8	31.5	36.2	-4.7
4	4.3	3.9	0.4	8.6	6.2	2.4	142.1	110.3	31.8	142.5	110.6	31.9
5	5.2	3.2	2.0	7.4	7.1	0.3	153.5	133.2	20.3	153.8	133.4	20.4
6	3.9	2.9	1.0	17.0	14.7	2.3	13.9	12.6	1.3	22.4	19.7	2.7
7	3.8	-2.9	6.7	17.5	29.5	-12.0	6.5	10.7	-4.2	19.9	31.7	-11.8

从各个维度定位误差的统计结果可以大致看出，不论是组合定位和北斗单系统定位，Z 方向的定位误差所占的比重大于 X 和 Y 方向，Z 方向的定位误差在数米至百米量级范围内。X 和 Y 方向的定位误差均在十米量级的范围之内。

综合表 3 和表 2，在北斗系统 GDOP 值 30 以下时，组合定位和北斗单系统定位精度相当，定位误差都在十米量级。当北斗单系统 GDOP 值急剧恶化时，例如实验 4 和实验 5，GDOP 值到了 60 以上，此

时罗兰 C 与北斗组合定位性能更优。尽管组合定位能够带来几何布局的改善,但罗兰 C 信号传播的随机误差较大,即使对系统误差进行了校正,在罗兰 C 信号残余误差的影响量大于几何布局的改善量时,组合定位的性能得不到提升,例如实验 1 至实验 3。当几何布局的改善量大于罗兰 C 信号残余误差的影响量时,组合定位的性能可以得到提升,例如实验 4 和实验 5。

4 结语

分析结果表明影响罗兰 C 与 GNSS 组合定位性能的主要因素是罗兰 C 系统误差,提出校正—融合的组合定位算法来修正罗兰 C 系统误差。基于实测数据验证了所提方法的有效性,并与北斗单系统定位进行对比。基于实际研究结果,得到以下结论:

- ① 以蒲城罗兰 C 发播台和北斗系统进行组合定位,在 4~8 颗可用卫星资源的情况下,采用本文提出的算法可以达到数十米至百米量级的定位精度;
- ② 北斗和罗兰 C 组合定位能大大优化几何精度因子,包括 PDOP 和 TDOP;
- ③ 在北斗单系统 GDOP 值越大时,组合定位精度的改善程度越大。在 GDOP 小于 30 的情况下,组合定位不一定能改善定位精度,定位性能和北斗单系统相当;当北斗单系统 GDOP 值急剧恶化至 60 时,组合定位性能更优。

参考文献:

- [1] 李实锋. 罗兰-C 数字化定时接收机关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [2] 张戎, 路明, 龚涛, 等. 复杂电磁环境下罗兰 C 系统作为 GPS 备份的探讨[J]. 全球定位系统, 2010(4): 43-46.
- [3] 王森, 朱筱虹, 朱小辉, 等. 国外卫星导航系统的最新发展与思考[J]. 全球定位系统, 2015, 40(4): 61-64.
- [4] 张风国, 欧明, 刘钝, 等. 未来潜在 PNT 技术综述[J]. 全球定位系统, 2015, 40(6): 27-34.
- [5] WARD N, HARGREAVES C, WILLIAMS P, et al. Delivering resilient PNT[C] // 2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress, Prague: IEEE, 2015.
- [6] 曹可劲, 朱银兵, 张磊, 等. 罗兰 C 双台链交叉定位算法研究[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(3): 1-4.
- [7] 华宇, 郭伟, 燕保荣, 等. 我国授时服务体系发展现状分析[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 193-201.
- [8] 严建华. 罗兰 C 授时监测技术研究[J]. 现代导航, 2013(5): 331-337.
- [9] 刘辛涛, 胡安平. 长波导航系统拓展应用研究[J]. 现代导航, 2013(2): 116-119.
- [10] 马敏. eLoran: 未来卫星导航的备份[J]. 中国海事, 2015(11): 54-56.
- [11] 佟海鹏, 徐海刚, 刘兆平. 复杂环境下罗兰 C/北斗组合定位系统 GDOP 仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(5): 108-112.
- [12] 丁晓光. 对流层延迟改正正在 GPS 数据处理中的应用与研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [13] 武文俊, 李志刚, 李孝辉, 等. IGS 电离层产品在双向时间频率传递中的应用[J]. 宇航计测技术, 2012, 8(4): 51-54.
- [14] LIU Y H, LI X H, ZHANG H J, et al. Calculation and accuracy evaluation of TGD from IFB for BDS[J]. GPS Solutions, 2016(20): 461-471.
- [15] ZHANG Q, ZHAO Q L, ZHANG H P, et al. BDS Satellites and Receivers DCB Resolution[C] // Proceedings of the 5th China Satellite Navigation Conference, Nanjing: [s.n.], 2014: 187-197.
- [16] SONG S P, CHOI H H, KIM Y B, et al. Verification of GPS Aided Error compensation method for eLoran using raw TOA measurements[C] // 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, Korea: [s.n.], 2011.
- [17] 杨光, 欧阳光洲, 郝巍娜, 等. CAPS/罗兰 C 组合定位系统的 DOP 值研究[C] // 第四届中国卫星导航学术年会电子文集, 武汉: 第四届中国卫星导航学术年会组委会, 2013.