

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.02.08

车载移动测量系统定位准确度测试方法研究

孙佩刚

(北京信息技术研究所, 北京 100094)

摘要: 阐述了移动测量系统的定位准确度需求, 对圆概率法、均方差法和中误差法三种位置准确度评估方法进行分析比较, 并在标准试验场内开展了车载 GNSS/INS 定位准确度测试。实验证明: 中误差法的评估结果最准确, 其误差小于 1 m, 明显优于圆概率法和均方差法。

关键词: 移动测量; 组合导航; 定位准确度; 中误差

中图分类号: TP311.5; TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)02-0035-05

Research on Positioning Accuracy Testing Method of Vehicle Mobile Measurement System

SUN Peigang

(Beijing Institute of Information Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The positioning accuracy requirement of mobile measurement system is expounded. The three methods of positioning accuracy evaluation, including the circular probability method, mean square error method and median error method are analyzed and compared. The positioning accuracy test of vehicle-mounted GNSS/INS is carried out in the standard test field. Experiments show that the evaluation result of the median error method is the most accurate, and its error is less than 1 m, which is obviously better than the circular probability method and the mean square deviation method.

Key words: mobile surveying; integrated navigation; positional accuracy; median error

0 引言

移动测量中拍摄点的位置、姿态信息与测量实景影像的位置准确度息息相关。因此, 在移动测量系统测试或验收中, 经常要求对车载组合导航设备自身定位准确度指标进行测试。由于移动测量系统大多使用了组合导航技术, 其定位准确度高、采样频率快, 因此需要寻找一种基于统计推断的定位准确度测试方法对其进行测试。

通过分析车载组合导航技术实现原理, 对经常用于位置评估的圆概率法(Circular Error Probable, CEP)、均方差法(Standard Deviation, STD)、中误差法(Root Mean Square, RMS)进行比较研究, 探讨各评估法的优缺点及其在车载移动测量系统中的适用性。通过跑车试验, 采集数十万组样本数据, 分别应用不同的准确度评估方法, 对解算结果进行分析、对比, 为移动测量组合导航系统定位准确度的设计和验收提供客观依据。

1 移动测量定位准确度需求

卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,

GNSS)可以在有卫星信号覆盖的区域下提供较高准确度的定位信息, 其定位准确度在米级。但在实际移动测量中, 车辆要时常经过桥梁、隧道、高层建筑等信号不稳区域, 致使短时间内 GNSS 系统失灵; 移动测量高频拍摄时, GNSS 数据更新率低, 难以满足高动态观测业务下的位置跟踪需求。

惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)可在短期内提供较高的定位准确度, 但随着导航时间的增加, 定位误差会出现周期性振荡递增^[1]。不同的惯导系统定位准确度差别较大。例如, 在长航时航空惯导系统中, 1 h 内导航位置平均误差为 1.170 km; 10 h 内导航位置平均误差为 1.893 km^[2]。船用惯导系统中, 导航位置平均误差 24 h 内为 0.483 km^[3]。单纯依赖于惯性导航, 无法满足车载导航高准确度定位需求。

车载移动测量导航系统兼顾了 GNSS 系统和 INS 系统的优点。高准确度的卫星信号用于修正惯导数据, 抑制 INS 误差随时间积累的漂移; INS 信息短期定位准确度较高, 可以有效解决 GNSS 信号在动态环境中的采样率不稳定、信号失锁等问题, 满足车载移动测量系统的高准确度定位需求^[4]。典型车载 GNSS/INS 组合

导航系统结构如图 1 示。

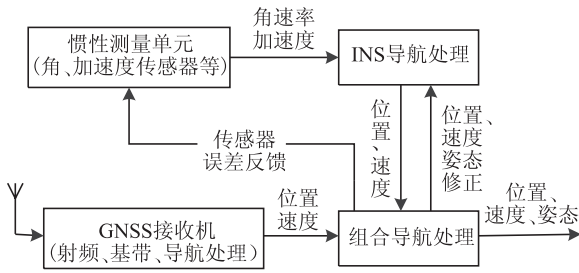


图 1 车载 GNSS/INS 组合导航示意图

车载组合导航系统输出的高程、速度及姿态信息大多采用均方根误差评估准确度，而位置准确度评估方法较多，常见的有惯导系统的圆概率法、圆概率误差半径最大值法^[5]，以及卫星导航系统的内符合准确度评估法（均方差法）、外符合准确度评估法（中误差）等^[6]，不同的评估方法对误差测量结果影响较大。由于车载组合导航系统水平定位准确度指标要求较高，一般在米级，因此有必要深入研究最适用于车载移动测量系统定位准确度的评估方法。

2 导航定位系统位置准确度评估方法

2.1 圆概率法

系统定位准确度用 $\bar{R}$ 来表示，算法如式(1)所示。

$$\bar{R} = K \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} RER^2(t_{ij})} \quad (1)$$

式中： $\bar{R}$ 为圆概率误差半径，英里/小时； K 为系数，当选择 50% 圆概率误差时， K 取 0.83；选择 95% 圆概率误差时， K 取 1.73； n 为有效试验次数； m_i 为第 i 次试验的数据采样点数； $RER(t_{ij})$ 为第 i 次试验第 j 个采样时刻的径向误差率，按式(2)计算。

$$RER(t_{ij}) = \frac{1}{T_{ij}} \sqrt{(\Delta\varphi_{ij})^2 + (\Delta\lambda_{ij} \cos\varphi_{ij})^2} \quad (2)$$

式中： T_{ij} 为系统第 i 次试验从零时刻至第 j 个采样时刻所经过的导航时间，h； $\Delta\varphi_{ij}$ 为第 i 次试验第 j 个采样时刻的纬度误差，min； $\Delta\lambda_{ij}$ 为第 i 次试验第 j 个采样时刻的经度误差，min； φ_{ij} 为第 i 次试验第 j 个采样时刻的纬度观测值，°。

2.2 均方差法

系统定位准确度用 σ 表示，算法如式(3)所示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

其中， Δx 、 Δy 为每个测量点坐标分量相对其均值的偏移量，即

$$\Delta x = X_i - \bar{X}$$

$$\Delta y = Y_i - \bar{Y}$$

其中，

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (4)$$

式中： X_i 为系统 X 轴坐标的第 i 次测量值， $\bar{X}$ 为 X 轴坐标的统计均值； Y_i 为系统 Y 轴坐标的第 i 次测量值； $\bar{Y}$ 为 Y 轴坐标的统计均值； n 为测量样本数。

2.3 中误差法

中误差法也称为均方根误差法，用 RMS 表示，算法如式(5)所示。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

式中： Δx 、 Δy 为每个测量点坐标分量相对其真实值的偏移量，即 $\Delta x = X_i - X_{i0}$ ， $\Delta y = Y_i - Y_{i0}$ 。 (X_i, Y_i) 为第 i 个采样点的位置测量坐标， (X_{i0}, Y_{i0}) 为第 i 个采样点的已知位置坐标或坐标真值； n 为测量样本数。

3 评估方法的分析及近似计算

3.1 评估方法的比较分析

圆概率法中的 n 为有效试验次数，为方便进行比较研究，此处归一化为 1。圆概率法的计算要用到变量 T_{ij} ，用来考察随着时间积累，定位误差的变化情况。这种方法适用于纯惯性导航系统的定位评估，而车载系统大多采用的是 GNSS/INS 组合导航模式，惯性导航的位置信息会周期性地通过 GNSS 信息进行修正，定位误差的累计会周期性地消除，使 T_{ij} 失去意义。另外，圆概率法直接采用经纬度参与位置误差计算，计算结果单位为英里，计算的粒度较大。即使将计算结果强行转换为米，也可能引入较大的计算误差，难以满足车载导航系统高准确度的定位需求。

均方差法和中误差法形式上较为接近，但二者参照的基准不同。均方差法参照的是组合导航设备自身多个采样点的统计均值，而中误差法参照的是高精度测量设备不同采样点的“真值”。因此，均方差法的定位准确度评估结果受载体运动的轨迹、速度影响明显，其评估结果不具实际意义，只限于理论推导。如果将其参照的基准调整为每次试验的系统误差，可以用于消除因测量方法所引入的固定误差^[7]。中误差

限于标准试验场可提供的测试范围。由于被测终端设备采用的是 GNSS 组合导航模式, 每秒 1 帧的卫星导航数据可以有效修正惯导数据, 使其不会出现累积误差, 后续的试验结果也证明了这一点。

4.3 跑车试验数据分析

分别做 7 次跑车试验, 试验中各组有效持续时间在 9.12 ~ 22.05 min 之间, 对应有效的定位采集帧数为 68376 ~ 165376。经时间同步后, 提取 7 组实验数据中的纬度、经度信息用于定位评估, 采用 Matlab 分别按照上述评估算法进行解算, 误差评估结果如表 1 所示。其中, 圆概率法的 K 取 0.83, 即选用 50% 圆概率法。

表 1 不同评估算法的误差评定结果 m

实验序号	样本数	圆概率法	均方差法	中误差法
实验序号 1	68376	18.0243	890.9	0.3388
实验序号 2	101001	2.7959	869.3	0.1302
实验序号 3	54001	12.5493	913.4	0.2861
实验序号 4	107876	2.4616	911.94	0.1445
实验序号 5	109501	7.0548	920.4	0.3309
实验序号 6	165376	4.0434	1330.3	0.8776
实验序号 7	163376	3.6302	1321.3	0.4003

通过表 1 可以看出, 对于相同的测量数据, 不同的评估方法所得出的评估结果差别很大。采用 50% 圆概率法进行跑车位置评估, 其误差约为几米至十几米; 均方差法的误差在 10^3 m 左右的量级上; 而中误差法的准确度在亚米级。究其原因, 50% 圆概率法一般要求采样数据的累积时间较长, 采样间隔一般为秒级, 以小时、英里为单位用于公式计算; 而本次跑车试验中, 采样频率为 125 帧每秒, 高频、短时的数据采集使得圆概率法引入了较大评估误差。

采用均方差法的误差很大, 几乎不能直接用于定位准确度评估。这是因为计算每个采样点 X 轴、 Y 轴坐标偏移量的参考基准为本次试验中所有采样点坐标 X 轴、 Y 轴坐标的统计均值, 按照此方法, 跑车行进距离、路线均会对此评估结果有显著影响。跑车运动距离越远, 行进路线越不重叠, 评估结果偏差越大。因此, 如果要使用均方差法, 就必须对坐标偏移的参考基点进行修改, 某些应用中使用均方差法来消除系统误差。

采用中误差法测得的误差较小, 评估准确度较高。这是因为在每次采样点上, X 轴、 Y 轴坐标偏移量的基

准为 POSLV610 输出的高准确度位置坐标, 且每个采样点的坐标偏移量不会随采样时间增加而累积; 反映在误差统计的结果上, 随着采样时间增加, 位置误差出现小幅波动, 但均在 1 m 以内。被测组合导航设备、POSLV610 二者均输出了小数点后 8 位以上的经纬度信息, 确保了很高的定位准确度。选中表 1 中的第 2 组试验数据, 使用中误差法计算得到的 X 轴、 Y 轴偏移量随采样点数的变化情况, 结果如图 3 所示。

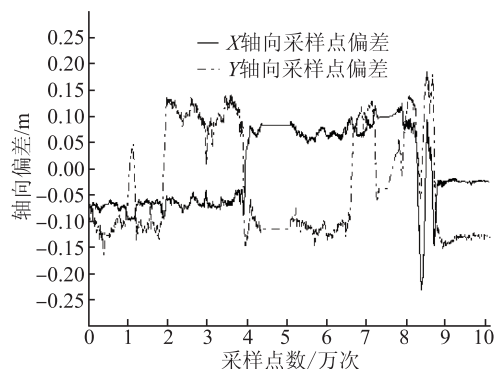


图 3 每个采样点的轴向偏差

通过图 3 可以看出, 就 101001 次采样数据而言, X 轴、 Y 轴偏移量的绝对值均在 0.25 m 以内。在各采样点, 已知 X 轴、 Y 轴偏移量, 根据勾股定理, 可以求得各采样点的测量值与基准值之间的距离, 如图 4 所示。

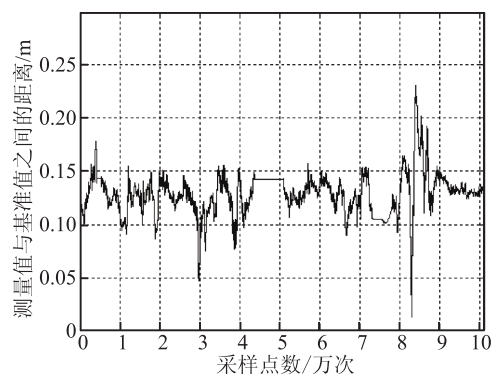


图 4 每个采样点的距离偏差

根据图 4 可知, 各采样点测量值与基准值之间的峰值距离均小于 0.25 m。由此可见, 采用 50% 圆概率法、均方差法存在较大的评估误差, 不能满足移动测量组合导航系统的高准确度定位评估需求; 而中误差法的评估结果为 0.1302 m, 反映在图 4 中为曲线上多数点的“长条型”的密集分布带, 符合 1σ 的大约 68.3% 误差点落在 $[0, 0.1302]$ 距离范围的计算预期。

5 结 论

对圆概率法、均方差法和中误差法进行理论分析，并结合跑车试验，证明中误差法更适用于移动测量系统 GNSS 组合导航的位置准确度评估，评估准确度在亚米级，能够满足一般测量级设备的定位准确度需求。值得注意的是，移动测绘中应保持较高的定位数据采样频率，至少在 100 Hz 以上；被测数据与基准数据处理过程中应当考虑到闰秒的存在，本次实验中闰秒取 18 s；从试验结果来看，为保证评估效果的准确性，参与计算的有效数据帧最好在 10⁶ 以上。

参 考 文 献

[1] 李跃, 邱致和. 导航与定位[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[2] 刘海涛, 黄雪妮, 李泱. 航空长航时惯导系统定位精度评估方法研究[J]. 航空制造技术, 2016, 498(3): 106 – 109.

[3] 王艳永, 贾兴荣, 高晖, 等. 基于统计推断的惯性定位精度评估方法对比[J]. 计算机应用, 2012, 32(s2): 276 – 279.

[4] 徐正鹏. 基于 MEMS/IMU 的车载组合导航技术研究[D].

武汉: 武汉大学, 2017.

[5] GJB 729 – 89 惯性导航系统准确度评定方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1989.

[6] 薛光辉. 水平定位精度测试方法及测试精度研究[J]. 科技资讯, 2014, 12(20): 193 – 195.

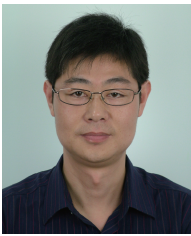
[7] 高伟, 奔粤阳, 李倩. 捷联惯性导航系统初始对准技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[8] POSLV Specifications[S]. Canada: Applanix Corporation, 2010.

[9] 王立宁, 乐光新, 詹菲. MATLAB 与通信仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2000.

收稿日期: 2019 – 01 – 16
基金项目: 中国博士后科学基金项目(2017M623389)

作 者 简 介



孙佩刚(1976 –), 男, 安徽嘉山人, 高级工程师, 2007 年 9 月毕业于东北大学信息科学与工程学院, 获工学博士学位, 主要研究方向为普适计算与嵌入式系统、软件测试、软件质量与可靠性等。

福禄克荣膺 2019 CAIMRS 三项大奖

2019 年 3 月 1 日, 第 17 届中国自动化及智能制造服务年会(简称 CAIMRS)在北京开幕。标志着企业创新发展足迹的新产品、新技术和新应用, 以及优秀企业、代表人物、创新模式等内容纷纷在大会上亮相。

本届大会吸引了近 500 家企业、上千名行业精英。会议期间, 企业界代表就自动化市场、智能制造市场以及国家发展政策等方面内容进行了分享, 并展开热烈的讨论, 展现出业内人士对行业创新发展的信心与激情。



本届大会上, 福禄克荣获“第十七届自动化及智能化年度评选”的三项大奖。对此, 该公司人士表示, 这是业界对福禄克公司 2018 年所获业绩及创新能力的肯定, 也是对福禄克未来发展的有力鞭策。公司将带着这份荣誉继续前行, 尽力为自动化行业提供先进的产品和优质的服务, 助力中国制造业的转型升级。

(刘倩倩 供稿)