

Research on Time to First Fix of a Space-based Positioning Technology based on IRIDIUM Signals of Opportunity

SUN GUIYU¹, QIN HONGLEI², ZHAO CHAO³

1,2,3. Beihang University, Beijing 100191, China.

1. sunguiyu96@gmail.com, 2. qhlmmm@sina.com

Abstract: Utilizing the space-based opportunity signal positioning technology of the IRIDIUM system as an emerging autonomous navigation technology, it can be used as an effective backup or supplement of the GNSS system. Time to First Fix (TTFF) is one of the main indicators for measuring positioning systems and reflects the responsiveness of positioning systems to achieve positioning. In order to investigate the TTFF of the space-based opportunistic signal positioning technology based on the IRIDIUM system and its influencing factors, this paper gives the definition of the TTFF of the technology, builds a set of test platforms, and the positioning results under different preset position deviations and different DOP of IRIDIUM satellites are compared through using actual collected data. The changes in positioning accuracy over a period of time after the first positioning were observed, and the factors affecting TTFF and accuracy were analyzed. The actual measurement results show that the TTFF based on the space-based opportunity signal positioning technology of the IRIDIUM system is better than 15 minutes, and the horizontal positioning accuracy is generally better than 500 meters. The positioning accuracy changes slowly after the first fixing. This study indicates that the TTFF is a meaningful index for evaluating the response capability of the positioning system, and lays the foundation for the continued research and application of positioning technology based on space-based opportunity signals.

Keywords: Opportunity signal; IRIDIUM; Space-based. Instantaneous Doppler Position; Time to First Fix.

基于铱星机会信号定位的首次定位时间研究

孙桂宇¹, 秦红磊², 赵超³

1,2,3. 北京航空航天大学, 北京, 中国, 100191

1. sunguiyu96@gmail.com, 2. qhlmmm@sina.com

【摘要】利用铱星系统的天基机会信号定位技术作为目前的一种新兴自主导航技术,可作为GNSS系统的有效备份或补充。首次定位时间(TTFF)是衡量定位系统的主要指标之一,反映了定位系统实现定位的响应能力。为了考察基于铱星系统的天基机会信号定位技术首次定位时间及其影响因素,本文给出了该技术首次定位时间的定义,搭建了一套测试平台,利用实际采集数据,对不同预设位置偏差、不同铱星几何分布条件下的定位结果进行了比较,观测了该技术在首次定位后一段时间内定位精度的变化,分析了首次定位时间及精度的影响因素。实测结果表明,在预设位置与真实位置距离不超过1000公里的情况下,基于铱星系统天基机会信号定位技术的首次定位时间均优于15分钟,水平定位精度普遍优于500米,首次定位后的定位精度变化速度较慢。本研究表明首次定位时间指标对评估定位系统的响应能力有意义,为基于天基机会信号的定位技术的继续研究和应用奠定基础。

【关键词】机会信号; 铱星; 天基; 瞬时多普勒定位; 首次定位时间

1 引言

随着卫星导航系统为数量庞大的使用者们提供全球性、全天候便捷定位服务的不断进步和发展,各行各业对于定位服务的需要比以往更加迫切和严苛。

然而,在一些自然环境或人为活动的复杂环境中,全球卫星导航系统(GNSS)信号易变得不值得信赖,

此外,建立一套GNSS需要耗费巨大的物力和财力。而近些年提出的基于机会信号(AM/FM、移动通信信号、广播电视、低轨卫星等)的定位技术则有弥补以上不足的潜力。

低轨卫星信号应用在导航定位有以下几方面的优势:第一,低轨卫星的轨道约为常规GNSS卫星轨道的二十分之一,所以地面接收到的信号更强;第二,

低轨卫星速度更快，故其信号的多普勒的利用更有意义；第三，日趋丰富的低轨卫星资源无论在频带还是分布上都更密集^{[9][11]}。基于铱星机会信号的定位技术已经实现^[12]，借用现有的大量卫星资源，只需少量资金投入即可满足军民定位服务要求，协助提高已有的GNSS系统精度及性能，可作为现有系统的有效备份或补充。但由于其尚为一种新兴技术，目前测试体系尚不完善、测试流程尚不清晰、测试标准尚不统一。

首次定位时间（Time to First Fix, TTFF）通常是指接收机从接收到信号到输出首次可信定位的时间。作为衡量接收机性能的关键指标之一^[7]，可以反映出接收机的快速响应能力，该指标对定位技术的实际可用性具有重要的评估作用^[1]。

故本文针对目前已经实现的基于铱星机会信号的定位技术^[8]进行了首次定位时间的相关研究，并利用实际铱星信号完成相关实验测试。文章的结构如下：首先，对铱星的星座分布及信号体制简单介绍，随后说明利用铱星信号实现基于多历元瞬时多普勒定位的技术，并叙述对该技术首次定位时间测试的平台搭建和流程设计。最后，利用实际接收的铱星信号对该技术的首次定位时间进行了实验测试、分析并完成总结。

2 基于铱星机会信号定位技术

2.1 铱星系统概况

本课题主要研究对象为铱星星座下行链路实际信号，属于第二代全球电信卫星网络的一部分。2017年

1月，首批10颗IRIDIUM NEXT卫星发射成功。该星座以及相应的第二代终端及服务已于2018年开始投入使用。在2019年1月11日，SpaceX发射了另外10颗卫星。截止到2019年5月，IRIDIUM NEXT星座已经成功发射了75颗^[2]。

IRIDIUM NEXT星座将由81颗卫星组成，包括66颗低地球轨道卫星，6颗在轨备份卫星，9颗地面备份卫星，可实现对包括南北两极在内整个地球的信号覆盖^[10]。在已发射的75颗卫星中，70颗卫星轨道高度为625千米，另5颗卫星为720千米，轨道周期平均为97分钟。目前在轨工作卫星的近极圆轨道分为6个轨道面，倾角为86.6度，轨道间间隔除一个约为22度外，其余均约为31.6度。每条轨道上近似均匀分布11颗卫星。5条轨道上卫星沿同一方向飞行，另外一条轨道卫星反向，其轨道分布示意如图1所示。

铱星系统的用户链路信号采用多种调制方式结合的方案：每组为相邻的12个波束对总分配频带实现空分多址（SDMA）；每个波束的频带再按频分多址（FDMA）的方式分为多个频道，同时将这些频道按时分多址（TDMA）分为多条载波，最后利用时分双工（TDD）将同一用户的上下行链路分别置于同一条载波的不同帧内。

在实际铱星信号中，TDMA单帧长为90ms，其中分配给单工信道最短6.5ms，最长20.32ms的下行用户链路时隙，其余部分则由4个双工信道的8.28ms长度上下行链路时隙构成^[6]。具体单帧结构如图2所示：

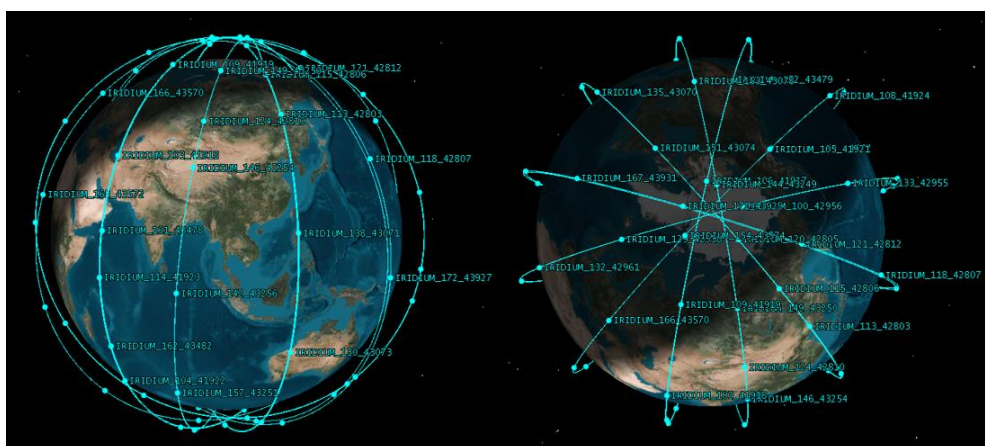


Figure 1. Iridium Constellation Orbit Distribution Diagram Main View (Left), Bottom View (Right)

图 1. 铱星星座轨道分布示意图主视图（左）、仰视图（右）



Figure 2. Iridium signal single frame structure

图 2. 铱星信号单帧结构

需通过铱星系统传输的信息经差分四相相移键控 (DQPSK) 调制, 再与二进制移相键控(BPSK)调制后的独立字组合, 过根升余弦滤波器进行脉冲整形, 之后将 2.6ms 长的单音信号置于上述经组合整形的信号前, 最后将处理完的信号上变频得到 90ms 的突发信号, 即为铱星系统下行链路的突发信号^[3]。

2.2 基于铱星机会信号的瞬时多普勒定位技术

信号的发射源和接收端的相对运动是多普勒现象产生的原因, 多普勒频移则是卫星与接收机位置、速度相对关系的反映^[5]。可利用多颗卫星的瞬时等多普勒圆锥曲面交点计算出接收机位置。

本课题采用的基于铱星机会信号的定位技术将铱星下行链路中突发信号的单音信号的多普勒频移作为定位观测量, 再利用公开的两行轨道根数 (Two-Line Element, TLE) 数据及 SGP4 预测模型输出铱星相应卫星的位置及速度^[4], 最后利用瞬时多普勒定位技术, 实现多历元静态定位^[8]。实际采用的是基于此技术自行开发的软件, 软件的定位流程图如图 3 所示:

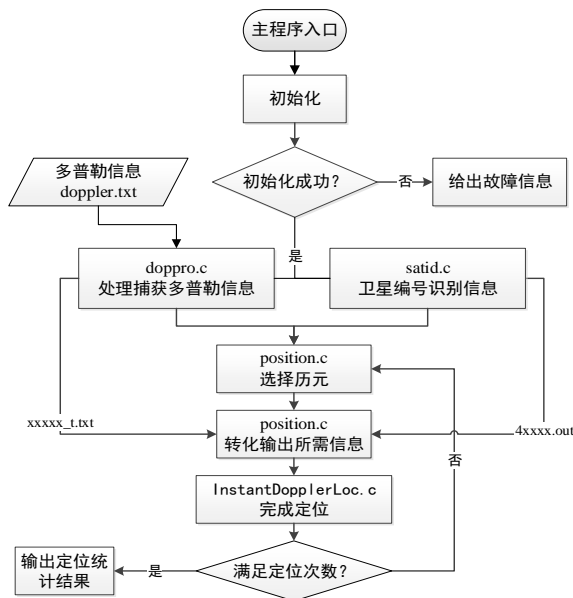


Figure 3. Flow Chart of Positioning Procedure

图 3. 定位程序流程

3 基于铱星机会信号定位首次定位时间测试

3.1 铱星静态定位首次定位时间及测试平台

基于铱星机会信号定位技术的首次定位时间是指在初始位置预设值与实际位置距离超过 50 公里不超

过 1000 公里的情况下, 利用已有的 TLE 文件, 瞬时多普勒定位软件系统以 1 分钟为步长连续统计利用不同长度铱星信号得到的定位结果, 当定位结果首次满足重复定位结果二维定位误差均值达到 500 米以内时, 使用的铱星信号的历元时间长度。

由于基于铱星信号的多历元瞬时多普勒定位方法的特殊性, 本文设计了一套针对于该方法的利用实际铱星信号的首次定位时间测试平台, 实现了在采集实际铱星信号之后, 利用已采集信息及已下载的 TLE 文件完成多普勒信息提取与分割、卫星轨道预测、定位结算与评估的软件协作功能, 该平台的模块衔接方式如图 4 所示:

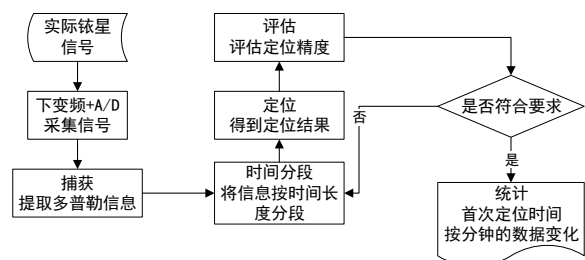


Figure 4. Actual Signal Test Platform Connection Diagram

图 4. 实际信号测试平台衔接图

具体测试流程如下:

- 1) 采集实际铱星信号。
- 2) 处理采集的实际铱星信号, 采用信号时域检测技术对数据进行连续检测, 数据块长度为 90ms, 当检测到数据块中存在信号时, 提取多普勒信息。随后将其按 1 分钟为段分割为不同时间长度的铱星多普勒频率信息。
- 3) 将铱星多普勒信息及预先下载好的 TLE 文件输入定位程序, 利用 SGP4 轨道预测模型预测出所需时刻卫星位置和速度信息。将预设位置初始化, 运行定位结算程序, 得到定位的统计结果。单次定位采用 25 个观测历元多普勒信息作为定位观测量。其中, 每次定位结果均为若干次单次定位结果经平滑滤波得到的定位结果。真实接收天线位置采用 GPS 记录仪 (误差在米级) 进行标定。
- 4) 将定位结果输出到评估系统中, 若满足条件则记录此时对应的时间长度, 若不满足则输入下一时间长度的铱星信号多普勒信息, 重复步骤 3) 直至达到首次定位的要求。
- 5) 统计并输出该过程中每分钟定位误差及相关测试变量的数据变化。

3.2 铱星静态定位首次定位时间测试

应用采集到的实际信号按照上述测试流程进行了3组测试，分别研究预设位置偏差对首次定位时间及精度的制约关系，卫星几何分布对首次定位时间及精度的影响以及分析首次定位后一段时间内的精度变化。

3.2.1 铱星首次定位时间测试

按照上述的测试流程对基于铱星机会信号的定位技术进行测试，测出其首次定位时间及精度。

(1) 测试时间及地点

将铱星信号采集系统平台放置在北京航空航天大学田径场东北角处(39.979706 N, 116.339296 E)采集数据。时间为2019年9月10日约17点。

(2) 测试结果及分析

15分钟的多普勒信息如下图5所示：

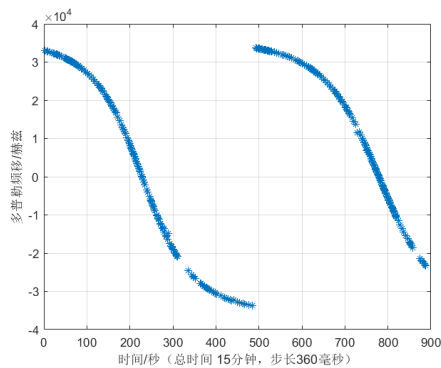


Figure 5. Curve: Iridium Signal Doppler Shift
图 5. 铱星信号多普勒频移曲线

可以看出本次测试中，15分钟内可见卫星数量仅为2颗，同一时刻最多可见卫星数量为1颗。图中第1颗可见卫星是卫星刚刚进入可视范围，前8分钟内该卫星一直可视；第2颗卫星与第1颗卫星属于同一轨道，9-15分钟可视，且两颗卫星星下点轨迹与天线位置距离较近。

分别采用6-15分钟（以1分钟为步长）不同长度的铱星信号进行共10次多历元定位，预设的接收机初始位置距离真实位置58.9千米。得到不同时间长度的定位结果进行统计和处理，结果如下：

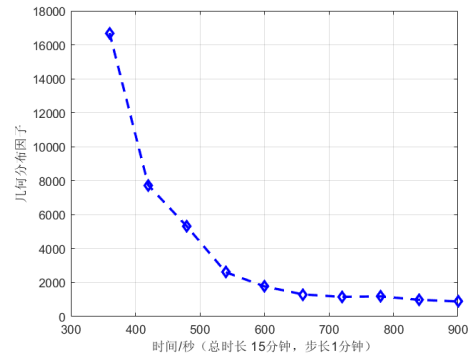


Figure 6. The Change of Doppler DOP with Time
图 6. 多普勒几何精度因子随时间的变化

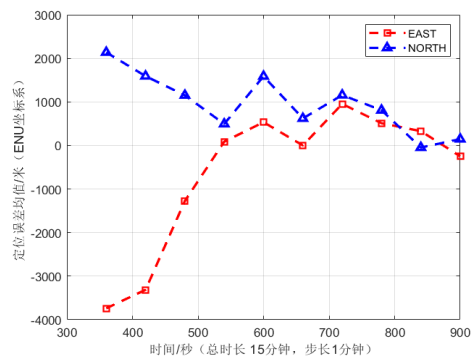


Figure 7. Mean Error in East and North Directions (ENU)
图 7. 东向、北向定位误差均值 (ENU)

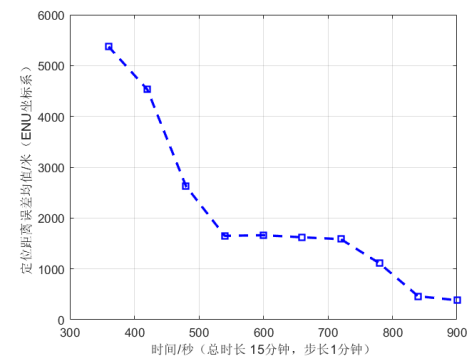


Figure 8. Mean Error of 2D Positioning Distance (ENU)
图 8. 二维定位距离误差均值 (ENU 坐标系)

定位结果显示，随着定位时间的增长，定位的几何分布因子明显下降，意味着定位结果的可信度相应的有明显上升。6-9分钟时，二维定位误差从超过5千米迅速减少至2千米以内，9-12分钟时定位误差则变化不大，均在1.6千米左右波动，在超过14分钟时，定位误差均值均小于500米。在全过程中，东北向的误差差距不大。在14分钟时，定位结果首次满足了首次定位的要求，即本次测试的首次定位时间为14分钟。

3.2.2 预设位置偏差对首次定位时间影响测试

在上述首次定位测试的基础上，改变初始条件，在预设的接收机位置与真实位置距离从 20 公里到 3000 公里的不同初始条件下分别采用不同长度的铱星信号进行定位，得到定位结果如下表所示：

Table 1. Relationship between Preset Position and TTFF

表 1. 预设位置偏差与首次定位时间关系			
	预设位置偏差/公里	TTFF/分钟	定位精度/m
1	8.87	14	357.81
2	58.89	14	357.81
3	135.43	14	357.81
4	429.30	14	357.81
5	1613.23	14	357.81
6	2154.09	\	\
7	2770.87	\	\
8	3131.50	\	\

从表 1 中可以清晰的看出，在当预设位置偏差在 1000 公里以内时，首次定位时间及精度均未受到影响；在该误差超过 1000 公里之后，该技术受到位置偏差的制约，在大多数的情况下，处于失灵状态。

3.2.3 卫星几何分布对首次定位时间影响测试

对接收到不同几何分布的铱星下行信号情况下，按照上述的测试流程进行对比测试。

(1) 测试时间及地点

将铱星信号采集系统平台放置在北京航空航天大学游泳馆前停车场处(39.979768 N, 116.342275 E)采集数据。时间为 2019 年 11 月 14 日约 16 点。

(2) 测试结果及分析

15 分钟的多普勒频移信息如下图 9 所示：

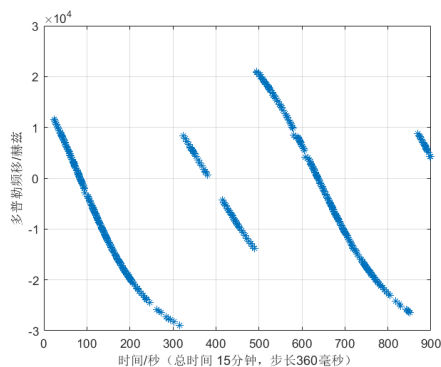


Figure 9. Curve: Iridium Signal Doppler Shift
图 9. 铱星信号多普勒频移曲线

从图 9 可看出，本次测试的卫星几何分布与前一

次明显存在不同。15 分钟内可见卫星数量共有 4 颗，同一时刻最多可见卫星数量为 2 颗。图中第 1 颗星前 5 分钟内一直可视；第 3 颗卫星与第 1 颗卫星属于同一轨道，8-14 分钟可视。图中第 2 颗星 6-8 分钟可视，可视时间较短；第 4 颗卫星 14-15 分钟可视，与第 2 颗卫星属同一轨道，与第 1、3 颗卫星不同。

预设的接收机初始位置距离真实位置 68.9 千米。其中，5-15 分钟长度的铱星信号定位分别重复测试 50 次，得到不同时间长度的定位结果，定位结果如下：

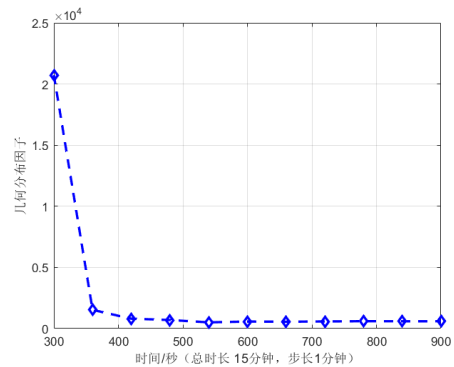


Figure 10. The Change of Doppler DOP with Time
图 10. 多普勒几何精度因子随时间的变化

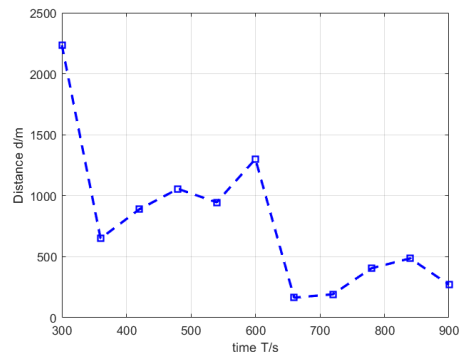


Figure 11. Mean Error of 2D positioning Distance (ENU)
图 11. 二维定位距离误差均值 (ENU 坐标系)

定位结果显示，由于本次测试铱星信号来自于两个轨道的铱星，在第 2 颗星的信号加入后，几何分布因子出现了断崖式的降低，定位精度也随之出现了飞跃式的提高，在第 3 颗星（与第 1 颗星同轨）加入后，定位的几何分布因子并未出现前文测试中第二颗同轨卫星加入后的那种改善。5-10 分钟，二维定位误差从超过 2 千米减少至 1 千米以内；7-10 分钟，定位误差在 1 千米左右波动；11-15 分钟，定位误差均小于 500 米。综上，本次测试首次定位时间为 11 分钟。在利用的观测信息包含了两个不同轨道上卫星发射的信号时，首次定位时间得到明显的改善。

3.2.4 首次定位后定位精度变化测试

对 30 分钟的实际铱星信号进行测试, 比较在首次定位后较长时间内定位精度的变化, 分析首次定位时间指标是否对评估定位系统的响应能力有意义。

(1) 测试时间及地点

将铱星信号采集系统平台放置在北京航空航天大学体育馆前停车场(39.979705 N, 116.342308 E)采集数据。时间为 2019 年 10 月 9 日约 22 点。

(2) 测试结果及分析

30 分钟的多普勒频移信息如下图 13 所示:

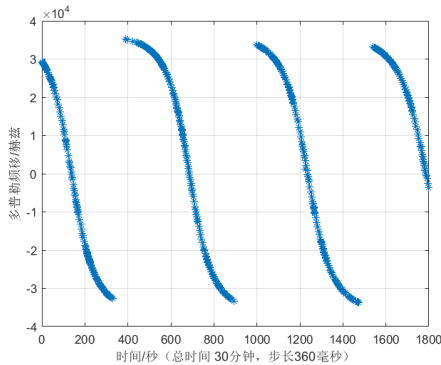


Figure 12. Curve: Iridium Signal Doppler Shift
图 12. 铱星信号多普勒频移曲线

从图 12 可以看出, 本次测试中, 30 分钟的时长内可见卫星数量为 4 颗, 同一时刻最多可见卫星数量仍为 1 颗。第 1 颗星前 6 分钟内一直可视; 第 2 颗星 7-15 分钟可视; 第 3 颗星 17-25 分钟可视; 第 4 颗星 26-30 分钟可视。图中 4 颗星均属于同一轨道, 且星下点轨迹与天线位置距离较近。

预设的接收机初始位置距离真实位置 58.6 千米。经测试得到不同时间长度的定位结果, 结果如下:

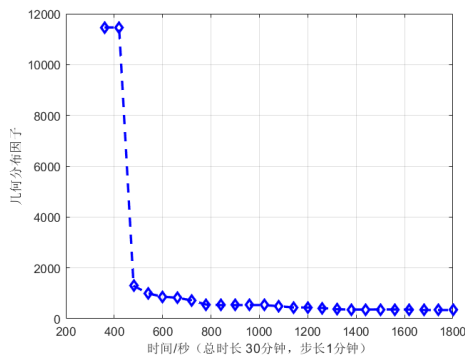


Figure 13. The Change of Doppler DOP with Time
图 13. 多普勒几何精度因子随时间的变化

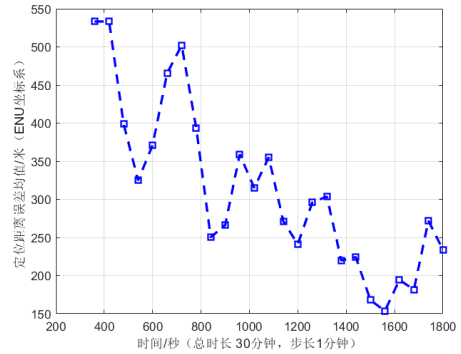


Figure 14. Mean Error of 2D positioning Distance (ENU)
图 14. 二维定位距离误差均值 (ENU 坐标系)

定位结果显示, 本次定位结果整体较好。随着时间的增长, 几何分布因子在 6-8 分钟内明显下降, 在 9-30 分钟内缓慢下降。从整体来看, 定位误差随时间的增加呈现下降的趋势。6-7 分钟时, 定位误差相对较大, 均值误差超过 500 米; 9 分钟定位误差首次在 500 米以内; 20 分钟后定位精度明显提高至 300 米以内, 综上, 本次测试中, 定位首次定位时间为 9 分钟。9 分钟后定位精度会在 20 分钟以内缓慢提高至 300 米, 但精度提高速度较慢, 本次测试表明首次定位时间指标对评估定位系统响应能力有意义。

4 结束语

从测试结果可以看出, 目前基于铱星机会信号的定位技术的首次定位时间在 14 分钟左右。接收机至少需要采集到两颗较为完整的铱星信号才可以得到一个满足要求的、较高精度的定位结果。由于铱星星座的覆盖性、瞬时多普勒定位算法等原因, 基于铱星信号定位技术的首次定位时间与目前的 GNSS 接收机相比较长, 但这不妨碍其在 GNSS 受到干扰时的成为替代系统的可靠及应用性或其展示出的与目前较成熟的其他导航方式组合的极大潜力。

从每次定位结果和首次定位时间的几种影响因素来看, 在预设位置偏差在 1000 公里以内时, 预设位置的偏差并不会对首次定位时间及精度有较大的影响; 较好的几何分布因子对短时间内定位精度的改善比较明显, 相应的, 对首次定位时间指标的改善也相对明显, 但是其对长期的定位精度改善并没有太大的意义。本次测试整体表明首次定位时间指标对评估定位系统响应能力有意义。基于此, 有效利用多个不同轨道上的铱星发射的信号, 提高卫星位置及速度观测量的精度, 可以作为提高首次定位时间指标的一个主要发展的方向。在首次定位时间上的发展也会令基于天基机会信号导航定位技术的应用性大大提高。

References (参考文献)

- [1] Chen Shu, Zhang Rui, The Start time to first fix test of BDS new signal structure receiver[J], Science of Surveying and Mapping, 2019,44(6),P84-88(Ch).陈澍, 张锐, 北斗新体制信号接收机首次定位时间测试 [J]. 测绘科学, 2019,44(6), P84-88.
- [2] Clark, Stephen , Launch timeline for Iridium's eighth launch with SpaceX[EB/OL], <https://spaceflightnow.com/2019/01/11/launch-timeline-for-spacexs-eighth-mission-for-iridium/>, 2019-01-11.
- [3] CMR Shahriar, A scheme to mitigate interference from Iridium satellite downlink signal captured by omnidirectional antenna array[C], IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008.1-4.
- [4] David A. Vallado, Paul Crawford, Richard Hujsak, T. S. Kelso, Revisiting Spacetrack Report #3[R], AIAA, 2006. 1-88.
- [5] I. Ali, N. Al-Dahahir, J.E. Hershly, Doppler Characterization for LEO Satellites[J], IEEE Transactions on Communication, 1998, 46(3). 309-313.
- [6] MIN S Q. Satellite communication system engineering design and application[M], Beijing: Electronics Industry Press, 2015. 352-361(Ch).闵士权. 卫星通信系统工程设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015, P352-361.
- [7] M. Kirkko-Jaakkola, J. Parviainen, J. Collin, and J. Takala, Improving TTFF by two-satellite GNSS positioning[J], IEEE Trans. Aerosp. Electron, 2012, 48(2). 3660–3670.
- [8] Qin Honglei, Tan Zizhong, Cong Li, Zhao Chao, Research on positioning technology based on IRIDIUM signals of opportunity[J/OL], Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, P1-12.秦红磊, 谭滋中, 丛丽, 赵超, 基于铱星机会信号的定位技术研究, [J/OL], 北京航空航天大学学报, 2019, P1-12.
- [9] Reid, Tyler G R , et al, Leveraging Commercial Broadband LEO Constellations for Navigation[C], The 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, 2016.
- [10] SR Pratt, RA Raines, GH Gunsch. MATemple, An overview of the IRIDIUM (R) low Earth orbit (LEO) satellite system[C], Aerospace and Electronics Conference, 1998. 152-159.
- [11] ZAHER(ZAK) M.KASSAS, JOSHUA.MORALES, JOE J.KHALIFE, New-Age Satellite-Based Navigation STAN: Simultaneous Tracking and Navigation with LEO Satellite Signals[J]. InsideGNSS,2019,7/8.56-65.
- [12] ZIZHONG TAN, HONGLEI QIN , LI CONG , AND CHAO ZHAO, New Method for Positioning Using IRIDIUM Satellite Signals of Opportunity, IEEE Access, 2019, 7. 83412-83422.