

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.03.017

导航增强伪卫星时间同步技术与精度分析

杨芳¹, 范金峰¹, 马军², 马中刚², 吴小鸥², 廖宝全²

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031;

2. 国网思极神往位置服务(北京)有限公司, 北京 102211)

摘要:以导航增强为背景, 总结归纳了伪卫星工程应用中面临的四大技术难点: 时间同步技术、星历编排广播技术、多路径效应和远近效应, 并重点对时间同步技术进行了研究。伪卫星作为现有导航星座的补充卫星, 一方面改善了星座的几何分布, 而另一方面由于授时和时间维持能力有限, 又会在原有测距误差的基础上引入新的误差。因此, 在伪卫星引入时, 需要定量地分析授时精度与几何分布两者之间的关系。通过将授时误差等效为系统误差, 给出了在导航增强条件下的伪卫星授时精度要求不等式, 该不等式受到伪卫星引入前后精度因子 $PDOP_0$ 和 $PDOP_1$ 以及用户测距误差标准差 σ_{UERE} 的影响; 定量给出了伪卫星授时精度要求的性能要求, 当授时精度满足不等式要求时, 导航增强系统才能提高用户定位/授时精度。

关键词: 伪卫星; 时间同步技术; 导航增强

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2021)03-0132-05

Time Synchronization Technology and Precision Analysis on Navigation Enhanced Pseudolite

YANG Fang¹, FAN Jin-feng¹, MA Jun², MA Zhong-gang², WU Xiao-ou², LIAO Bao-quan²

(1. State Grid Co., Ltd., of China, Beijing 100031, China;

2. State Grid ShenWang LBS (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: For the navigation enhancement system, four technical difficulties in pseudolite engineering applications are summarized, which are time synchronization technology, ephemeris scheduling and broadcasting technology, multi-path effect and near-far effect. This paper focuses on the study of time synchronization technology. On the one hand, a pseudolite improves the geometric distribution of constellation, on the other hand, a new range error is introduced because of the limited timing and maintaining ability. Therefore, the relationship between timing accuracy and geometric distribution should be analyzed quantitatively when pseudolites are introduced. By equating the timing error to the system error, an inequation for timing accuracy of pseudolite with navigation enhancement is given, which is influenced by the positioning dilution of precision (PDOP) before and after introducing pseudolite, as well as the standard variance σ_{UERE} of the user equivalent range error (UERE). The performance limit of timing accuracy of pseudolite is given quantitatively. When the timing accuracy meets the requirement of the inequation, the navigation enhancement system could improve the user positioning/timing accuracy.

Key words: Pseudolite; Time synchronization technology; Navigation enhancement

收稿日期: 2019-10-28; 修订日期: 2020-01-25

作者简介: 杨芳(1970-), 女, 硕士, 高级经济师, 主要研究方向为信息通信、数据标准、大数据应用等。

0 引言

伪卫星的概念最早于 20 世纪 70 年代提出^[1], 早期的伪卫星主要应用于导航接收机的测试^[2]。而后伪卫星被应用在飞机近场着陆中并得到快速发展^[3-4], 同时, 在形变监测、火星探测和室内定位^[5]等领域得到成功应用。目前已形成两大发展趋势: 一是以澳大利亚 LOCATA 系统为代表的独立导航定位系统^[6], 该系统独立于全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 而单独为特定用户提供定位服务, 可在室内^[7-9]或室外应用; 二是作为 GNSS 的增强单元, 通过增加一颗伪卫星与卫星导航系统配合使用, 人为地改善卫星几何精度因子 (Dilution of Precision, DOP), 进而提高用户定位/授时服务的性能, 一般应用在室外, 通常称为导航增强系统。

国内伪卫星系统研究起步较晚, 其中具有代表性的研究有河海大学的何秀凤教授针对全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 与伪卫星组合增强定位, 提出了单独伪卫星观测模型和增强模型, 并研究了其组合定位算法^[10-11]。国内高校在伪卫星组网、布局优化以及定位算法方面也有较深入的研究^[12-13]。尽管伪卫星概念提出时间较早, 但因存在诸如远/近效应、信号数据编码和时间同步等问题, 在一定程度上限制了其发展^[14]。

1 伪卫星技术难点

以伪卫星导航增强系统为例, 目前伪卫星技术主要面临四大技术难点, 分别是时间同步技术、星历编排广播技术、多路径效应和远近效应。

时间同步技术: 伪卫星内部仅装有晶体振荡器, 无法满足导航定位/授时的需要, 如何实现伪卫星与卫星导航系统的时间同步以及基准维持是确保伪卫星导航增强系统有效工作的前提。目前主要采用 GNSS 授时的方法实现, 分为单向测量、共视测量以及载波相位技术^[15]。关于伪卫星时间同步技术和精度要求会作为研究的重点内容。

星历编排广播技术: 伪卫星一般静止在地面或处于低速运动状态, 与高速运动的真实导航卫星存在轨道高度和运动速度方面的差异。由于星历编排中的字长限制, 导致伪卫星运动状态无法用现有的导航星历表示, 目前可用的解决方法包括修改星历比例因子或重新编排星历格式^[16], 但上述方法需

要对接收机进行软件升级或改造。

多路径效应: 是指接收机天线除接收到直达的导航卫星信号外, 可能还会接收到一个或多个反射信号。导航增强系统中伪卫星一般铺设在地面, 地形和遮挡问题严重, 多路径现象明显, 存在引入伪卫星反而降低用户定位精度的情况, 目前的解决方法包括接收机软件算法改进, 例如采用窄相关和估计检测等以及扼流圈天线设计^[17-18]。

远近效应: 因伪卫星距离用户较近, 由于用户运动导致伪卫星伪码之间的互相关干扰, 从而影响接收机对真实导航卫星信号的捕获和跟踪, 本质上来说, 远近效应是一个互相关干扰问题。目前的解决方法包括伪卫星信号设计、多门限多峰检测法以及时分体制设计。

上述内容阐述了伪卫星技术在实际应用中面临的主要问题以及解决方法。在导航增强系统中, 伪卫星时间系统的标定和对准是系统正常工作的前提, 下面对时间同步的方法以及精度要求进行分析。

2 时间同步技术

全球卫星导航系统维持了一个统一的时空基准, 以北斗导航系统为例, 各卫星的时间由星内原子钟维持, 卫星依靠地面站和星间链路保持时间同步, 并采用统一的北斗时表示。伪卫星需要依靠授时技术达到与北斗时的同步, 而时间同步的精度直接影响导航增强系统的性能。基于导航卫星的授时技术大体可分为传统授时和精密授时两类。

2.1 传统授时技术

按照是否已知伪卫星位置坐标可将传统授时技术分为已知伪卫星坐标和未知伪卫星坐标两种情况:

- 已知伪卫星坐标

伪卫星首先采用实时动态载波相位差分技术 (Real-Time Kinematic, RTK) 实现对自身位置的确定, 随后仅需要一颗导航卫星即可完成授时, 目前授时型接收机多采用此类方法, 授时精度优于 10ns。

- 未知伪卫星坐标

伪卫星需要至少利用四颗导航卫星同时完成定位与授时工作, 目前传统的商用接收机多采用此工作模式, 易知该授时精度低于已知伪卫星坐标条件, 一般为 10~20ns。

2.2 精密授时技术

精密授时技术是指利用国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 组织提供的精密星历, 结合精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技术等实现对伪卫星的高精度授时, 一般可实现 3~5ns 的授时精度。

- IGS 超快速星历

IGS 超快速星历可实时获取, 轨道精度约 6cm, 钟差精度约 4ns, 理论上应用 PPP 技术需要实现纳秒级的钟差估计, 因而 IGS 超快速星历无法满足要求。

- IGS 快速星历

IGS 快速星历时延 3~9h, 轨道精度约 3cm, 钟差精度约 150ps, 可作为 PPP 技术的有效输入。

表 1 所示为 IGS 网站提供的 IGS 超快速星历与快速星历的轨道/钟差精度、实时性以及更新周期统计表。

表 1 IGS 精密星历与钟差 (GPS)

Tab. 1 IGS precision ephemeris and clock bias (GPS)

类型	精度	实时性	更新周期
IGS 超快速星历	轨道	~6cm	实时
	钟差	~4ns	
IGS 快速星历	轨道	~3cm	延迟
	钟差	~150ps	

3 伪卫星授时精度要求分析

影响用户定位/授时精度的因素有两点: 伪距或载波相位的测量误差和 DOP 值。伪卫星的引入一方面改善了 DOP 值, 但另一方面授时误差会转换成测距误差而降低用户定位/授时精度, 两者间存在矛盾关系, 如何确保伪卫星的引入能够提高用户的定位/授时精度, 本质上来说需要推导伪卫星授时精度要求表达式。

假设真实卫星数量为 N , 卫星到用户距离测量值满足正态分布, 即用户等效测距误差 (User Equivalent Range Error, UERE) 均值为 0, 方差为 σ_{UERE}^2 , 且彼此独立。则用户三维定位误差 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 与钟差 $\epsilon_{\delta t_u}$ 方差为

$$\text{Cov} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{\delta t_u} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & & & \\ & h_{22} & & \\ & & h_{33} & \\ & & & h_{44} \end{bmatrix} \sigma_{\text{UERE}}^2 \quad (1)$$

$$\begin{cases} HDOP = \sqrt{h_{11} + h_{22}} \\ VDOP = \sqrt{h_{33}} \\ PDOP = \sqrt{h_{11} + h_{22} + h_{33}} \\ TDOP = \sqrt{h_{44}} \\ GDOP = \sqrt{h_{11} + h_{22} + h_{33} + h_{44}} \end{cases} \quad (2)$$

设式(1)对角矩阵元素分别为 h_{11}, h_{22}, h_{33} 和 h_{44} , 则式(2) $HDOP, VDOP, PDOP, TDOP$ 和 $GDOP$ 分别为水平、垂直、三维、钟差和 DOP, 可得三维坐标下的定位精度误差 σ_P 为

$$\sigma_P = PDOP \cdot \sigma_{\text{UERE}} \quad (3)$$

设引入的伪卫星因授时误差导致的测距误差均值为 ζ , 方差亦为 σ_{UERE}^2 。当存在伪卫星时, 推导三维坐标下定位精度均值为

$$\begin{aligned} E(\epsilon_{XYZ}) &= E \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{\delta t_u} \end{pmatrix} = E((\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \epsilon_p^{(n)}) \\ &= \begin{bmatrix} -I_x^{(1)} & \cdots & -I_x^{(N)} & -I_x^{(N+1)} \\ -I_y^{(1)} & \cdots & -I_y^{(N)} & -I_y^{(N+1)} \\ -I_z^{(1)} & \cdots & -I_z^{(N)} & -I_z^{(N+1)} \\ 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \zeta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -I_x^{(N+1)} h_{11} \zeta \\ -I_y^{(N+1)} h_{22} \zeta \\ -I_z^{(N+1)} h_{33} \zeta \\ h_{44} \zeta \end{bmatrix} \approx |\zeta| \cdot PDOP^2 \quad (4) \end{aligned}$$

设增加伪卫星前后的用户三维定位误差分别表示为 ϵ_{XYZ0} 和 ϵ_{XYZ1} , 假设两者均满足正态分布, 即

$$\begin{cases} \epsilon_{XYZ0} \sim N(0, PDOP_0^2 \cdot \sigma_{\text{UERE}}^2) \\ \epsilon_{XYZ1} \sim N(|\zeta| \cdot PDOP_1^2, PDOP_1^2 \cdot \sigma_{\text{UERE}}^2) \end{cases} \quad (5)$$

$PDOP_0$ 和 $PDOP_1$ 分别表示增加伪卫星前后的三维精度因子, 将其归一化表示为

$$\begin{cases} X_0 = \frac{\epsilon_{XYZ0}}{PDOP_0 \cdot \sigma_{\text{UERE}}} \sim N(0, 1) \\ X_1 = \frac{\epsilon_{XYZ1} - |\zeta| \cdot PDOP_1^2}{PDOP_1 \cdot \sigma_{\text{UERE}}} \sim N(0, 1) \end{cases} \quad (6)$$

以 3σ 范围为界, 讨论 X_0 和 X_1 大小关系, 则有

$$\begin{aligned} P\{-3\sigma < X_0 < 3\sigma\} &= P\{-3\sigma < X_1 < 3\sigma\} \\ &= \Phi(3) - \Phi(-3) = 99.74\% \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P\{0 \leq \epsilon_{XYZ0} < 3PDOP_0 \cdot \sigma_{\text{UERE}}\} &= \\ P\left\{|\zeta| \cdot PDOP_1^2 \leq \epsilon_{XYZ1} < \right. & \\ \left. 3PDOP_1 \cdot \sigma_{\text{UERE}} + |\zeta| \cdot PDOP_1^2\right\} & \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)是式(7)的化简形式,当增加伪卫星后,以 3σ 为界,需满足如下约束

$$3PDOP_1 \cdot \sigma_{\text{UERE}} + |\zeta| \cdot PDOP_1^2 < 3PDOP_0 \cdot \sigma_{\text{UERE}} \quad (9)$$

$$|\zeta| < \frac{3\sigma_{\text{UERE}}}{PDOP_1} \cdot \left(\frac{PDOP_0}{PDOP_1} - 1 \right) \quad (10)$$

式(10)表示测距误差均值 ζ 需满足的不等式关系,可见 ζ 的选择受到 $PDOP_0$ 和 $PDOP_1$ 以及用户等效测距误差标准差 σ_{UERE} 的影响。

4 算例分析与仿真

从式(10)出发,用户等效测距误差标准差 σ_{UERE} 组成如表 2 所示^[19],取典型值 $\sigma_{\text{UERE}} = 7.1$,使用 STK 软件进行仿真。2019 年 10 月 1 日,北京时间 06:37:00,用户位于东经 112.91°,北纬 28.25°,此时可见 GPS 卫星表示如图 1 所示,对应 $PDOP_0 \approx 2.80$ 。当在用户附近处引入伪卫星后,对应 $PDOP_1 \approx 1.41$ 。则利用式(10)可得

$$|\zeta| < \frac{3 \times 7.1}{1.41} \left(\frac{2.80}{1.41} - 1 \right) \approx 14.89(\text{m}) \quad (11)$$

对应的伪卫星授时误差约为 49.7ns,也就是说,只有当伪卫星授时误差优于 49.7ns 时,引入的伪卫星才可以作为导航增强单元提高用户定位/授时精度,而通过第 2 节的分析易知,采用普通的商用接收机即可实现。

表 2 标准定位服务的典型 UERE 预算 (GPS)

Tab. 2 Typical UERE budget for standard location services (GPS)	
误差源	1σ 误差/m
广播时钟	1.1
L1 P(Y)-L1 C/A 群时延	0.3
广播星历	0.8
电离层延迟	7.0
对流层延迟	0.2
接收机噪声和分辨率	0.1
多径	0.2
总计(RSS)	7.1

为更直接地说明算法的正确性,在上述仿真环境的基础上,假定伪卫星授时精度为 20ns 时,给出对应的定位结果如图 2 所示,可见用户定位精度有明显提升;假定伪卫星授时精度为 60 ns 时,用户定位精度反而降低,如图 3 所示。

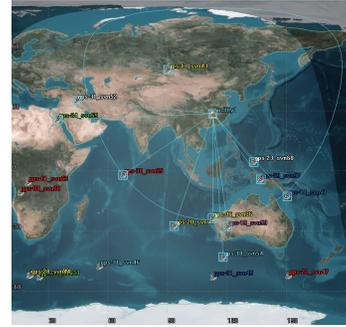


图 1 STK 可见卫星数效果图

Fig. 1 STK visible satellite map

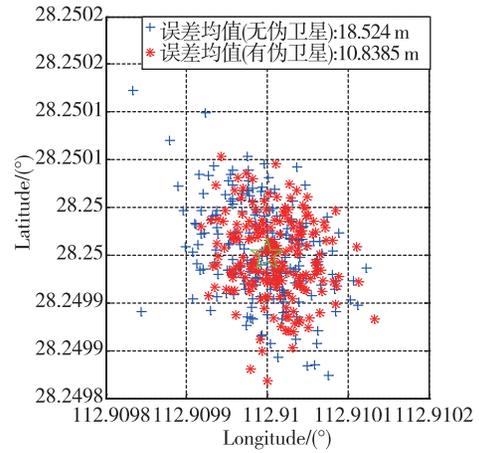


图 2 伪卫星授时精度 20ns 对应定位精度分析

Fig. 2 Analysis on positioning accuracy of timing accuracy of pseudolite in 20ns

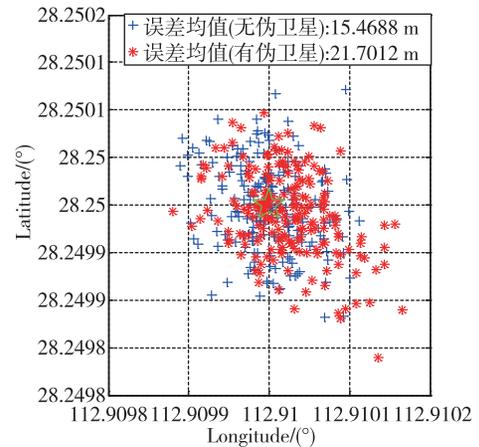


图 3 伪卫星授时精度 60ns 对应定位精度分析

Fig. 3 Analysis on positioning accuracy of timing accuracy of pseudolite in 60ns

5 结论

以伪卫星导航增强系统为背景,给出了伪卫星实际应用中面临的主要问题,重点分析了时间同步技术,并给出了时间同步方案以及伪卫星授时精度要求不等式,该不等式受到伪卫星引入前后精度因

子 $PDOP$ 和用户测距误差标准差 σ_{USERE} 的影响,可根据实际情况,计算该地区对伪卫星时间同步精度的要求,从而给出指导性意见。以 2019 年 10 月 1 日,北京时间 06:37:00,用户位于东经 112.91°,北纬 28.25° 为例,给出伪卫星授时精度要优于 49.7ns,才可以作为导航增强单元提高用户定位/授时精度,普通商用接收机就可以满足该授时要求。

参考文献

- [1] Ndili A. GPS pseudolite signal design[C]// Proceedings of the ION GPS. Salt Lake City, UT, 1994: 1375-1382.
- [2] Harrington R L, Dolloff J T. The inverted range: GPS user test facility [C]// Proceedings of IEEE PLANS'76. San Diego, California, 1976: 204-211.
- [3] Cobb H S. GPS pseudolites: theory, design, and applications[D]. Stanford University, 1997.
- [4] Bartone C G, Kiran S. Flight test results of an integrated wideband airport pseudolite for the local area augmentation system[J]. Navigation, 2001, 48(1): 35-48.
- [5] 邓中亮,尹露,唐诗浩,等.室内定位关键技术综述[J].导航定位与授时,2018,5(3):14-23.
Deng Zhongliang, Yin Lu, Tang Shihao, et al. Survey of key technology for indoor positioning[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(3): 14-23(in Chinese).
- [6] Barnes J, Rizos C, Wang J, et al. LocaNet: intelligent time-synchronized pseudolite transceivers for cm-level stand-alone positioning[C]// Proceedings of 11th IAIN World Congress. Berlin, Germany, 2003.
- [7] Kee C, Jun H, Yun D. Indoor navigation system using asynchronous pseudolites[J]. Journal of Navigation, 2003, 56(3): 443-455.
- [8] Im S H, Jee G I, Cho Y B. An indoor positioning system using time-delayed GPS repeater[C]// Proceedings of the Institute of Navigation, 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, ION GNSS. Fort Worth, Texas, USA, 2006: 2478-2483.
- [9] Samama N. Indoor positioning with GNSS-like local signal transmitters[M]. Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications, InTech, 2001.
- [10] 桑文刚,何秀凤,陈永奇.基于精度因子几何结构的独立伪卫星布局研究[J].测绘通报,2013(9):1-4.
Sang Wengang, He Xiufeng, Chen Yongqi. Configuration of pseudolite-alone positioning system based on DOP geometry structure[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(9): 1-4(in Chinese).
- [11] 桑文刚,何秀凤,陈永奇.区域伪卫星增强 GPS 精密定位试验研究[J].中国科技论文在线,2008,3(11):835-840.
Sang Wengang, He Xiufeng, Chen Yongqi. Experiments of results of local area pseudolites augmented GPS[J]. Sciencepaper Online, 2008, 3(11): 835-840 (in Chinese).
- [12] 刘超,高井祥,于子晏,等.GPS/伪卫星相对定位中伪卫星优化布设模型研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(1):120-126.
Liu Chao, Gao Jingxiang, Yu Ziyang, et al. An optimal pseudolites location model of GPS/pseudolites integrated relative positioning[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(1): 120-126(in Chinese).
- [13] 孙婧齐.基于载波相位测量的室内定位系统及定位解算的研究[D].上海:华东师范大学,2013.
Sun Jingqi. Research on indoor positioning system and positioning algorithm based on carrier phase measurement[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013(in Chinese).
- [14] 谢钢.GPS原理与接收机设计[M].北京:电子工业出版社,2009.
Xie Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009(in Chinese).
- [15] Lombardi M, Nelson L, Novick A, et al. Time and frequency measurements using the global positioning system[J]. Cal Lab: The International Journal of Metrology, 2001, 8: 26-33.
- [16] Ma C, Chen J, Yang J, et al. Beidou compatible indoor positioning system architecture design and test evaluation[C]// Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), Volume I. Springer Singapore, 2016.
- [17] Zhang C, Ren Q, Wei C, et al. Designing of near-far effect cancellation receiver of groundwork pseudolite [C]// Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), 2015.
- [18] 王春华,吴文平,王晓辉,等.3D扼流圈天线设计[J].数字通信世界,2014(8):15-18.
Wang Chunhua, Wu Wenping, Wang Xiaohui, et al. Design of dualband 3D choke ring antenna[J]. Digital Communication World, 2014(8): 15-18(in Chinese).
- [19] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications (Second Edition)[M]. Artech House, 2006.

(编辑:李瑾)