

伪卫星系统关键技术发展及其应用*

唐文杰^{1,2} 陈俊平^{* * 1,2}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100102)

摘要: 全球导航卫星系统(GNSS)在隧道、室内、城市峡谷等复杂环境下服务性能明显降低。在此挑战环境下,伪卫星能用来生成和发送与GNSS系统类似的信号,在GNSS拒止环境下为用户提供位置、速度等不间断的导航信息。此外,可以将伪卫星体制调制与GNSS一致,用户接收机实现伪卫星/GNSS同步接收,通过与GNSS、惯性导航系统等组合导航,实现复杂环境下的GNSS导航定位增强,有望在自动驾驶、室内导航、自动机器人等领域发挥重要作用。

关键词: 伪卫星;全球导航卫星系统;远近效应;多路径效应;大气延迟;时间同步

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2023.03.002

Key Technology Development and Application of Pseudolite System*

TANG Wenjie^{1,2} CHEN Junping^{* * 1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100102, China)

Abstract: The service performance of the Global Navigation Satellite System (GNSS) has significantly decreased in complex environments such as tunnels, indoor and urban canyons. In this challenging environment, pseudolites can be used to generate and transmit signals similar to GNSS systems, providing users with uninterrupted navigation information such as location and speed in GNSS rejection environments. In addition, the pseudolite system can be modulated to be consistent with GNSS, and the user receiver can achieve synchronous reception of pseudolites/GNSS. Through integrated navigation with GNSS and inertial navigation systems, GNSS navigation and positioning enhancement in complex environments can be achieved, which is expected to play an important role in fields such as autonomous driving, indoor navigation, and automatic robots.

Keywords: Pseudolite; Global Navigation Satellite System; Near-Far Effect; Multipath Effect; Atmospheric Delay; Time Synchronization

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是一种使用环绕地球的卫星和控制地面辅助设备来提供覆盖全球的定位、导航和

授时(Positing, Navigating, Timing, PNT)功能的系统^[1-3],具有精度高、全球化、全天候等优点。

尽管GNSS功能强大且应用广泛,但作为天

* 国家自然科学基金“卫星导航数据处理时空基准精化关键技术研究”(11673050)

* * E-mail: junping@shao.ac.cn

基无线电导航系统仍存在固有缺陷。GNSS 卫星距离地球表面两万公里左右,导航信号到达用户接收机时已经非常微弱,并且在传播过程中容易受到各种干扰^[4]。对于室内、隧道、城市峡谷等特殊环境,用户接收机若无法接收到四颗及以上卫星,就可能无法正常使用 GNSS 的 PNT 服务^[5]。

各种替代和增强型辅助系统正在开发中^[6-9],其中地基伪卫星导航定位系统(Pseudolite, PL)已被广泛研究和应用^[10,11]。伪卫星是一种用于生成和发送类似于 GNSS 信号的设备^[12]。伪卫星系统不仅可以在复杂环境中增强 GNSS 系统,还可以在 GNSS 拒止环境下提供独立的导航定位服务^[13]。

与 GNSS 卫星相比,伪卫星离用户接收机非常近,通常在几百米到几公里的范围内。因此,伪卫星导航定位系统和 GNSS 在误差源和处理方法上存在许多差异,需要对伪卫星导航定位系统的定位模型参数估计和定位模型误差改正进行进一步的研究^[14]。本文拟介绍伪卫星系统的原理以及三种应用方向,并对伪卫星应用的关键技术问题及解决方法进行讨论。

1 伪卫星系统原理

伪卫星系统主要由四部分组成:伪卫星基站、伪卫星监测站、伪卫星信号网络运行管理系统和相应的伪卫星用户接收机(图1)。该系统可以理解为将导航卫星固定在地面上,利用组网伪卫星基站的坐标预先精确测量,并在导航信息中广播。伪卫星系统的原理与 GNSS 系统相似,也需要至少四个基站来提供四维时空服务^[15],由基站发送导航信号,用户接收机接收信号以计算用户接收机和基站之间的距离。

在 GNSS 系统中,卫星的位置通常由卫星星

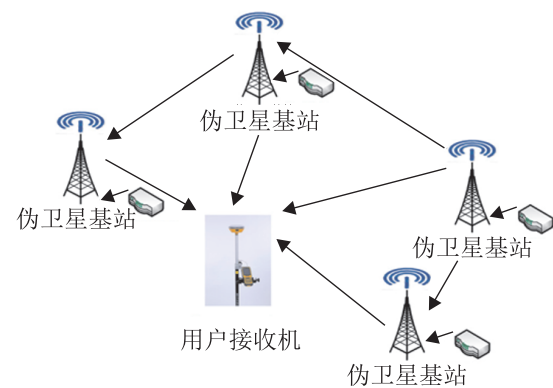


图1 伪卫星系统示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Pseudolite System

历获得,而伪卫星的位置一般为固定值。此外,伪卫星通常布设在地面或者低空,因此一般不考虑电离层延迟。

频率 f 上对伪卫星 j 的伪距观测值 P_f^j 为

$$P_f^j = \rho^j + c \cdot \overline{\delta t} - c \cdot \overline{\delta t^j} + T^j + b_{f,p}^r - b_{f,p}^s + \varepsilon_{p_j} \quad (1)$$

式中, ρ^j 为伪卫星质心至接收机参考点的几何距离, $\overline{\delta t}$ 和 $\overline{\delta t^j}$ 分别为真实接收机和伪卫星的钟差, T^j 为对流层延迟, $b_{f,p}^r$ 和 $b_{f,p}^s$ 分别为频率 f 上接收机端和伪卫星端的伪距硬件延迟, ε_{p_j} 为频率 f 上包含多路径误差在内的其他误差和伪距观测噪声, c 为光速。

对于频率 f 上以距离为单位的相位观测值 L_f^j , 其观测模型可表达为

$$L_f^j = \rho^j + c \cdot \overline{\delta t} - c \cdot \overline{\delta t^j} + T^j + \lambda_f \cdot \overline{N_f^j} + \lambda_f \cdot W^j + b_{f,L}^r - b_{f,L}^s + \varepsilon_{L_j} \quad (2)$$

式中, $\overline{N_f^j}$ 为频率 f 上的相位模糊度(具有整周特性) λ_f 为频率 f 上的波长, 即 $\lambda_f = c/f$, W^j 为以周为单位的相位缠绕误差。

2 伪卫星系统应用

2.1 伪卫星独立组网

在室内、隧道、地下建筑等复杂场景, GNSS 卫

星信号完全被遮挡,甚至完全不可用时,可以使用伪卫星系统作为 GNSS 的备用系统,完全独立地进行工作。由于目标区域的范围一般事先可知,因此可以在目标区域灵活地布设伪卫星基站,提前精确测量伪卫星基站的位置,使得各伪卫星基站之间形成的几何构型最优,这样就可以得到较高的定位精度。而且,伪卫星系统的播发频率可以根据使用场景以及用户需求灵活确定,提高了伪卫星系统的可用性。

值得注意的是,对于地球以外的区域,如月球、火星等,用户无法接收到 GNSS 信号时,伪卫星系统也可以独立组网,为宇航员、宇航车的活动提供高精度的 PNT 服务。此时,需要解决的一个重要问题就是伪卫星基站坐标的确定。斯坦福大学提出了一种新的自校准伪卫星阵列 (Self Calibrating Pseudolite Array, SCPA)。阵列中的伪卫星基站可以同时发射和接收导航信号,在不需要独立参考站的情况下通过差分的方式,消除发射机和接收机之间的钟差^[16,17]。

2.2 伪卫星增强 GNSS

伪卫星可以在以下几个方面对 GNSS 进行增强。

1) **增加 GNSS 的覆盖范围和观测时段:**虽然 GNSS 具有全球性、全天候等优点,但是由于卫星运动以及地物遮挡,在目标区域的某些观测时段可见卫星数量过少,导致用户定位精度大幅度降低甚至无法定位。而伪卫星系统的加入就可以增加 GNSS 的覆盖范围和观测时段(图 2)。

2) **提高 GNSS 定位的精度:**定位系统的定位精度主要与测量误差、卫星的几何分布有关。在目标区域合适地布设伪卫星基站,不仅可以从平面上降低 GNSS 卫星的平面精度因子 (Horizontal Dilution of Precision, HDOP) 值,而且由于伪卫星

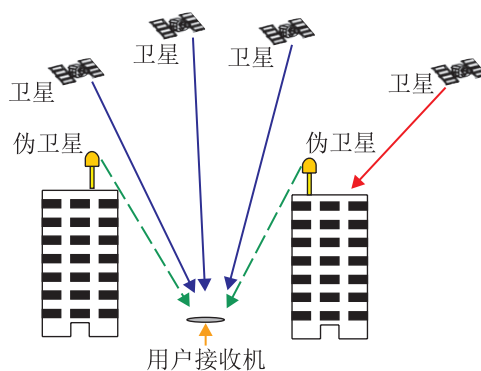


图 2 复杂环境伪卫星增强 GNSS 示意图

Fig.2 Schematic Diagram of Pseudolite Enhanced GNSS in Complex Environment

基站通常布设在地面或者低空,高度角相对较低,因此在高程方向上也能显著降低高程精度因子 (Vertical Dilution of Precision, VDOP) 值,从而整体优化目标区域的几何构型,提高定位精度。

3) **提高 GNSS 定位的求解速度:**相对 GNSS 卫星,伪卫星基站与用户接收机的距离通常比较近,因此对于动态定位模式,不同观测历元之间的相关性相对较低,可以提高载波相位测量中整周模糊度的求解速度。

2.3 伪卫星组合导航

惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 不依赖外部信息,可以提供短时的三维定位和定向信息。由于其高自主性,在军事领域被广泛应用。但是 INS 也存在其固有缺陷:误差会随时间不断积累,无法长时间独立工作。利用 GNSS 和 INS 的互补性,通过卡尔曼滤波将 GNSS 卫星和 INS 的信息相融合,一些学者提出了 GNSS/INS 组合导航系统^[18,19]。在无法接收 GNSS 卫星信号时,INS 可以独立定位,当 GNSS 信号良好时,GNSS 又可以修正 INS 随时间累积的误差。

但在 GNSS/INS 组合导航系统中,GNSS 的稳定性和可靠性会受到可见卫星数及其几何构型

所影响。在城市峡谷等 GNSS 信号遮挡严重的区域, GNSS/INS 组合导航系统整体的可靠性和精度也会下降,因此有必要在原有系统的基础上,引入伪卫星系统,组成新的 PL/GNSS/INS 组合导航系统。伪卫星系统的加入,可以显著提高组合导航系统定位的精度和连续性。

3 伪卫星系统关键技术

3.1 系统布站

伪卫星布站是伪卫星系统组网的前提,影响着系统的覆盖范围和定位精度。伪卫星布站的目标是在伪卫星基站数量有限的情况下同时获得最高的信号覆盖率和最优的几何构型。

近年来,对伪卫星系统布站的研究主要集中在特殊场景下基站的几何构型,而模拟实验也是不考虑遮挡的理想情况。解放军信息工程大学分析了不同星座和不同伪卫星数量下的定位精度,但缺乏对伪卫星星座设计的讨论^[20];河海大学利用伪卫星基站和接收机构成的多面体的体积与精度因子近似成反比,分析了独立伪卫星系统设计中应避免的几何构型,但没有给出伪卫星布站的理想方案^[21];北京航空航天大学结合四面体体积法,通过构建最佳观测矩阵来改善伪卫星基站的几何构型,并给出了伪卫星基站数量为4时的最佳分布,但没有考虑到伪卫星数量大于4的情况^[22];空军工程大学提出了一种基于经验的搜索方法,该方法具有一定的优化效果,但结果具有随机性^[23];美国联合航空公司提出了使用岭回归算法来减少定位结果的全局均方误差,但这不是用户的最佳解决方案^[24];电子科技大学提出了一种考虑用户位置信息的基于粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的伪卫星布站方法,可以提高伪卫星系统的定位精度,但所提出的

伪卫星布站策略没有考虑实际环境^[25];中国电子科技集团公司第二十研究所提出了在无人机进场时部署伪卫星系统需要满足的约束条件以及布设策略^[26];中国科学院上海天文台提出了一种基于多目标粒子群算法(Multi-objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)的伪卫星布站方法,结合数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据,综合考虑了伪卫星系统的信号覆盖率和几何构型,但是没有考虑实际使用场景中地表建筑物、桥梁和树木等对伪卫星系统的影响^[27]。由此可见,伪卫星系统布站方法还需要进一步的研究。

3.2 远近效应

用户接收机的接收功率与发射机到接收机距离的平方成反比^[28]。GNSS 卫星分布在远离地表的的不同轨道平面上,对于地面上的用户接收机来说,信号到达时的功率基本上是接近的。而伪卫星基站通常布设在地面或者低空,用户接收机与伪卫星发射机之间的距离明显较近,因此当两者之间的距离发生变化时,接收机接收到的信号功率会发生剧烈变化^[29]。当接收机在近边界内时,接收机接收到的伪卫星的功率会更强。如果不进行相关处理,强信号就会对卫星信号造成干扰,导致接收机无法正常捕获和跟踪相对较弱的信号。另一方面,如果用户接收机在远边界外,伪卫星信号会由于衰减等原因产生微弱的信号功率,使接收机无法接收伪卫星信号,从而导致接收机的跟踪环路失锁,这种现象称为远近效应(图3)^[30]。

对于伪卫星的远近效应问题,可以从软件和硬件两方面来改善。硬件方面主要是通过伪卫星基站和伪卫星接收机的硬件结构来改进^[31,32]。软件方面主要是改善伪卫星信号中的编码、调制方式和载波频率等或者修改接收机相关捕获、跟踪通道的方式,具有成本低、无需对现有硬件进行改

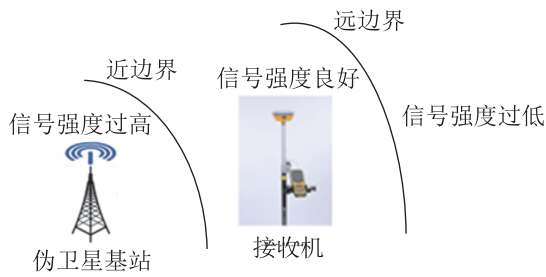


图3 远近效应示意图

Fig.3 Schematic Diagram of Near-Far Effect

动和效果明显的优点^[33,34]。在软件方面主要有时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA)、码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA)、频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 三种方法^[35-37]。在伪卫星系统定位中,综合这三种方法的优点,可以在一定程度上减小远近效应造成的误差。

3.3 多路径效应

由于观测站周围反射源所反射的卫星信号与直接进入接收机天线的卫星信号会产生干涉,从而使观测值产生误差,此现象称为多路径效应^[38]。由于传播路径和周围环境的影响,相对GNSS而言,多路径效应对伪卫星系统的影响更为严重,所造成的定位误差是一种非随机误差,通过直接差分改正很难消除^[39]。通过对伪卫星监测站的数据分析发现,伪距观测值中包含着较大的多路径误差,这与伪卫星系统的布局密切相关。

对于多路径效应的抑制和消除主要集中在硬件方法和数据后处理方法上。前者对导航信号的多路径抑制有很好的效果,但需要使用昂贵的反多路径天线和特殊的数字信号电路设计,后者更容易实现。硬件方法主要分为两类:一类是通过改进天线设计和位置来降低接收到的多路径信号,另一类是在数字信号接收机上通过信号跟踪环设计^[40]和多路径估计方法来处理^[41]。数据

后处理常用的方法有:载波相位平滑伪距法、小波法、数字滤波法、恒星日滤波法、信噪比法和天线阵列数据处理^[42-44]。需要注意的是,目前绝大多数的多路径估计算法都没有涉及到多路径条数的估计,例如文献^[45]提出了一种自适应MEDLL多路径估计算法,能在信噪比较低的状态下正确估计多路径信号条数。然而,将这些方法实际应用于伪卫星多路径处理的研究很少,大都是基于仿真数据,需要进一步研究分析。

3.4 大气延迟

与GNSS卫星相比,伪卫星非常接近用户接收机,通常在几百米到几公里的范围内。因此,伪卫星系统和GNSS在误差源和处理方法上存在许多差异。由于伪卫星工作环境的高度相对较低,通常不考虑电离层延迟误差。因此,与GNSS相比,对流层延迟误差在伪卫星系统中变得尤为重要,尤其是在相对较大的区域内定位,必须修正对流层延迟误差。

GNSS信号经过对流层时,受对流层折射的影响,传播路径和传播方向发生变化,从而使信号到达接收机的传播时间发生延迟,这种延迟称为对流层延迟。GNSS中使用的对流层延迟模型不能直接用于伪卫星系统。由于伪卫星信号传输路径通常在对流层底部且高度角较低,因此对流层延迟估计非常困难。国内外学者在GNSS对流层延迟模型的基础上,开发了一些适用于伪卫星系统的对流层延迟模型,如RTCA模型^[46]、MRTCA模型^[47]、Hopfield模型^[48]、Bouska模型^[49]和LTC模型^[50]。RTCA模型、MRTCA模型和Hopfield模型是通过积分方法建立的,其中大气折射率根据海拔高度进行建模,然后沿着伪卫星基站和用户接收机之间的信号传播路径进行积分。LTC模型假设对流层延迟误差与伪卫星基站和用户接收机之

间的距离成正比,使用距离比例法估计伪卫星系统的对流层延迟。虽然这些伪卫星系统的对流层延迟模型已经被提出,但很少有实验来评估这些模型的性能。仅有的一些实验也是在海平面处的标准大气状态下进行仿真,并没有在真实环境下进行的模型评估和比较。

3.5 时间同步

在伪卫星系统独立组网时,可以不依赖 GNSS 进行独立定位,提供高精度的定位服务。但是对于单点定位方法,时间同步精度直接影响测量精度,对定位性能有着至关重要的影响。在独立组网的伪卫星定位系统中,每个伪卫星基站的时钟都可以独立设置,但必须解决伪卫星基站之间的时间同步问题。考虑到成本因素,伪卫星基站一般不携带类似 GNSS 卫星那样高精度、长期稳定的原子钟,而是使用较为便宜的压控温补晶体振荡器(Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator, VCTCXO)作为时钟。这会造成严重的时钟漂移,影响服务性能。因此,为了保持伪卫星系统时间的高精度同步,有必要对伪卫星基站的时钟进行精细快速的调整。

时间同步可以通过有线或无线链路实现。前者可以通过在伪卫星基站之间铺设大量的光纤或电缆来实现,但容易受到地理环境的限制。相对而言,后者具有较高的灵活性,受地理环境和设备的影响较小。

如果伪卫星基站只具备发射测距信号的功能,则无线时间同步只需要一个参考站。文献^[51]提出了一种基于时钟同步监测站的时间差算法,该伪卫星时钟信号可以在主从伪卫星之间实现同步;文献^[52]提出了一种由多个同源时钟的伪卫星基站组成的异步伪卫星系统,可以从不同时钟信道之间的伪距观测差异中减去钟差,但是该方法

依赖于同源时钟伪卫星的可见性以及伪距测量精度;文献^[53]基于载波相位技术,采用钟差无线反馈方法,提出了一种独立的分布式伪卫星系统时间同步方法,并设计了实时钟差监测站和相应的伪卫星时钟同步器。

对于同时具有发射和接收测距信号功能的伪卫星系统,参考站不是必需的。文献^[54]提出了一种无需自身位置信息的双向测距同步方法,但由于仅使用伪距信息,同步精度较低。在已知伪卫星基站坐标的情况下,澳大利亚的 Locata 公司提出了一种新的时间同步技术——TimeLoc。TimeLoc 提供了一个自主同步的网络,类似于两个伪卫星基站之间的双向时间同步过程^[55]。文献^[56]提出了一种混合优化算法(Hybrid Optimizing Algorithm, HOA),将卡尔曼滤波算法和粒子滤波算法有机结合,兼具卡尔曼滤波算法迭代时间短和粒子滤波算法精度高的优点,能在更短的迭代时间内显著提高时间同步精度。

4 总结与展望

伪卫星系统作为一种地基无线电导航定位系统,可以在复杂环境下辅助增强 GNSS 的可靠性与稳定性。在 GNSS 拒止条件下,伪卫星系统可以作为独立的导航定位系统,为用户提供位置、速度等不间断的高精度导航信息,是综合 PNT 服务体系中的重要一环。但是,伪卫星系统布站、远近效应、多路径效应、大气延迟、时间同步等方面也会对伪卫星系统产生影响,影响其服务性能。此外,伪卫星是一种相对较新的定位系统,缺乏与其他导航系统组合的相关实验。但是,在解决上述的关键技术问题后,地基伪卫星系统将会在自动驾驶、室内导航、自动机器人等热门领域发挥重要作用。

除了传统的地基伪卫星系统,还有更多广义的伪卫星系统被提出,如空基伪卫星系统,以高空飞行器为例,可以在大气中连续工作数周甚至数月;水下伪卫星系统,由海面 GNSS 浮标与水下信号收发器组成,提供水下导航定位服务;深空伪卫星系统:月球伪卫星、火星伪卫星系统等。随着相关技术的迅猛发展,伪卫星系统将在综合 PNT 体系中起着愈发重要的作用,发展前景广阔。

参考文献

- [1] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5):505-510.
- [2] 杨元喜, 杨诚, 任夏. PNT 智能服务[J]. 测绘学报, 2021, 50(8):1006-1012.
- [3] 杨元喜. 弹性 PNT 基本框架[J]. 测绘学报, 2018, 47(7):893-898.
- [4] 焦文海, 丁群, 李建文, 等. GNSS 开放服务的监测评估[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2011, 41(5):521-527.
- [5] 徐肖豪, 杨传森, 刘瑞华. GNSS 用户端自主完好性监测研究综述[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 451-463.
- [6] 张小红, 马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9):1073-1087.
- [7] 黄丁发, 周乐韬, 卢建康, 等. GNSS 卫星导航地基增强系统与位置云服务关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2):388-395.
- [8] 张锐斌, 贾小林, 刘家龙. GNSS 星基增强基本性能评估[J]. 测绘科学, 2022, 47(3):1-8, 15.
- [9] 王雷, 倪少杰, 王飞雪. 地基增强系统发展及应用[J]. 全球定位系统, 2014, 39(4):26-30.
- [10] HARRINGTON R L, DOLLOFF J T. The Inverted Range: GPS User Test Facility [C]. IEEE PLANS'76. San Diego, California: IEEE, 1976: 204-211.
- [11] WOLF R, THALHAMME R M, HEIN G W. GATE-the German Galileo Test Environment [C]. Proceedings of the ION GNSS. Portland, USA: [s. n.], 2003:1009-1015.
- [12] WANG J. Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2002, 1(1):48-56.
- [13] 郭睿, 唐波, 刘利, 等. 伪卫星增强下的北斗系统服务精度仿真分析[J]. 测绘通报, 2014, 10: 7-10.
- [14] 何秀凤, 桑文刚, 杨光. 伪卫星增强 GPS 精密定位方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(3):461-462.
- [15] 刘峻宁, 翟传润, 宋嫡儿, 等. 基于改进时星差分的室内伪卫星精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(1):105-108.
- [16] LEMASTER E A. Self-calibrating Pseudolite Arrays: Theory and Experiment [D]. Stanford: Stanford University, 2002.
- [17] MATSUOKA M, ROCK S M, BUALAT M G. Autonomous Deployment of a Self-calibrating Pseudolite Array for Mars Rover Navigation [C]. PLANS 2004 Position Location and Navigation Symposium. [S. l.]: IEEE, 2004:733-739.
- [18] 牛小骥, 班亚龙, 张提升, 等. GNSS/INS 深组合技术研究进展与展望[J]. 航空学报, 2016, 37(10):2895-2908.
- [19] 王坚, 刘超, 高井祥, 等. 基于抗差 EKF 的 GNSS/INS 紧组合算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(5):596-600.
- [20] 孟键, 孙付平, 王爱兵. 伪卫星独立组网方案研究[J]. 海洋测绘, 2007, 27(1):12-16.
- [21] 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.
- [22] 宋倩, 张波, 李署坚. 地面伪卫星组网布设技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(3): 743-746.
- [23] 樊蓉, 孟觉, 邬蒙, 等. 临近空间伪卫星区域独立组网布局研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(3):

- 21-22, 17.
- [24] KELLY R J. Additional Results on ‘Reducing Geometric Dilution of Precision Using Ridge Regression’ [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(4):677-681.
- [25] 邵坤, 李坤, 王坚. 基于粒子群算法的伪卫星布局策略研究[J]. 通信技术, 2017, 50(11): 2454-2459.
- [26] 芦鑫元. 面向无人机进场的伪卫星布局与定位仿真技术[J]. 现代导航, 2021, 12(3):174-178.
- [27] TANG Wenjie, CHEN Junping, YU Chao, et al. A New Ground-based Pseudolite System Deployment Algorithm Based on MOPSO [J]. Sensors, 2021, 21:5364-5377.
- [28] 叶红军. 伪卫星远近效应分析与研究[J]. 无线电工程, 2010, 40(6):31-33, 61.
- [29] 马鹏程, 唐小妹, 朱祥维, 等. 伪卫星应用中远近效应及其抑制技术分析[J]. 全球定位系统, 2016, 41(5):28-34.
- [30] 武玉琨, 廉保旺. 伪卫星脉冲调制在抗远近效应中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 2: 473-475, 478.
- [31] 陈慧, 赵建伟, 邓军. 导航系统抗远近效应接收机的研究[J]. 电子学报, 2004(9):1475-1478.
- [32] 艾树峰, 俞群爱, 冯冀宁, 等. 抑制远近干扰伪卫星接收机的研究[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1837-1840.
- [33] 韩天柱, 曹建平, 陆明泉. 基于抗干扰天线的远近效应抑制技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10):1222-1225.
- [34] 施上, 王庆, 张波, 等. 基于正交子空间投影的伪卫星远近效应消除方法[J]. 全球定位系统, 2022, 47(3):9-15.
- [35] 刘杨, 金天, 李华军. 微弱GPS信号捕获中的远近效应消除方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5):1079-1084.
- [36] 汪婕, 廉保旺, 张志鹏. 基于干扰抵消的GPS伪卫星抗远近效应方法研究[J]. 测控技术, 2008(3):43-45, 48.
- [37] 张雷, 王建宇, 戴宁. 基于TDMA技术的伪卫星远近效应分析与研究[J]. 计算机技术与发展, 2007(11):167-170.
- [38] 黄丁发, 丁晓利, 陈永奇, 等. GPS多路径效应影响与结构振动的小波滤波筛分研究[J]. 测绘学报, 2001(1):36-41.
- [39] 田冰, 何秀凤, 桑文刚. 减小伪卫星多路径效应误差的试验研究[J]. 全球定位系统, 2006(6): 15-19.
- [40] 张雷, 王建宇, 舒嵘, 等. 基于GPS伪卫星的多径效应分析与研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(7):163-164, 203.
- [41] 张衡, 李雅宁, 甘兴利, 等. 伪卫星室内多径信号特性分析[J]. 无线电工程, 2018, 48(8): 639-642.
- [42] 杨荣华, 花向红, 吴文英, 等. GPS伪卫星变形监测中多路径改正的新方法[J]. 测绘通报, 2009(1):34, 36, 39.
- [43] 桑文刚, 黄黎明, 赵培华, 等. 伪卫星多路径效应分形特征及其削弱方法研究[J]. 测绘通报, 2020(10):58-62.
- [44] 符京杨, 周建华, 李广云. CNMC方法改进北斗/伪卫星协同定位精度分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(S2):188-193.
- [45] RTCA DO-246A, GNSS Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) -signal-in-space Interface Control Document (ICD) [S]. America: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2000.
- [46] 夏文清, 王庆, 张波, 等. 基于自适应MEDLL的伪卫星室内多径估计算法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 12:1-10.
- [47] BIBERGER R J, TEUBER A, PANY T, et al. Development of an APL Error Model for Precision Approaches and Validation by Flight Experiments [C]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the

- Institute of Navigation. Portland:ION, GPS/GNSS, 2003:2308-2317.
- [48] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, COLLINS J. GPS Theory and Practice [M]. New York:Springer-Verlag Wien,2000:382-382.
- [49] BOUSKA C T J, RAQUET J F. Tropospheric Model Error Reduction in Pseudolite Based Positioning Systems [C]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland:ION, GPS/GNSS, 2003:390-398.
- [50] CHOUDHURY M, HARVEY B, RIZOS C. Tropospheric Correction for Locata when Known Point Ambiguity Resolution Technique is Used in Static Survey-is It Required? [C]. IGSS Symposium. Gold Coast, Australia, 2009.
- [51] 刘海清, 赵丽, 黄兴, 等. 一种基于单差分法的伪卫星系统时间同步技术[C]. 2019年世界计算智能, 工程和信息技术大会(WCEIT 2019)论文集. 上海, 2019:372-377.
- [52] GAN Xingli, SHENG Chuazhen, ZHANG Heng, et al. Combination of Asynchronous Array Pseudolites and GNSS for Outdoor Localization[J]. IEEE Access, 2019, 7:38550 - 38557.
- [53] CHEN Jing, ZHAO Li, LI Chunhui, et al. Design of Clock Synchronization Based on Wireless Clock Difference Negative Feedback for Independent Distributed Pseudolite Systems [C]. 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Beijing, China:IEEE, 2022.
- [54] YUN D, KEE C. Centimeter Accuracy Stand-alone Indoor Navigation System by Synchronized Pseudolite Constellation [C]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: ION, GPS/GNSS, 2002:213-225.
- [55] 陈健熊, 彭良福, 黄勤珍. Locata定位系统的时间同步机制[J]. 全球定位系统, 2018, 43(2): 54-59.
- [56] 黄星, 赵利, 蔡成林, 等. 伪卫星时钟同步算法的研究[J]. 测控技术, 2021, 40(1):95-99.

作者贡献说明

唐文杰:收集资料,撰写文章初稿;

陈俊平:指导文章框架与撰写。

作者简介



唐文杰:博士研究生;主要研究方向:伪卫星导航定位技术。



陈俊平:研究员,博导;中国科学院上海天文台天文地球动力学中心副主任;高精度GNSS数据分析与应用课题组组长;主要研究方向:卫星导航数据处理技术、北斗地面运控信息处理技术。