



面向通导共生的低轨卫星机会信号定位管理

沈洁¹, 刘晖², 饶建兵², 贺泉², 本立言², 王治中¹, 熊瀛¹

(1. 北京零重空间技术有限公司, 北京 100084; 2. 卫星互联网国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 通导共生是指通信和导航信号共存于卫星生态环境中。针对定位或通信的单一功能低轨卫星星座, 在定位或通信信号不可用时难以快速进行定位管理的难题, 提出了应用扩展卡尔曼滤波器算法, 对低轨卫星通导共生星座的机会信号进行定位解算, 突破定位管理对单一导航系统的依赖。首先, 介绍了卡尔曼滤波的基本原理, 结合低轨卫星多星座定位管理算法, 提出了一种基于机会信号的卡尔曼滤波定位管理算法; 其次, 分析了所提算法的优点, 包括提高定位精度、提高定位效率、提高定位稳定性等; 最后, 进行了实验, 验证了所提算法的有效性。结果表明, 所提算法能够有效地提高定位精度、定位效率、定位稳定性, 为低轨卫星通导共生星座定位管理提供了一种有效的解决方案。

关键词: 全球导航卫星系统; 通导共生; 位置管理; 机会信号; 功率谱密度; 惯性导航系统; 扩展卡尔曼滤波器
中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023177

LEO satellite communication and navigation symbiosis positioning management based on signal of opportunity

SHEN Jie¹, LIU Hui², RAO Jianbing², HE Quan², BEN Liyan², WANG Zhizhong¹, XIONG Ying¹

1. Beijing ZeroG Space Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China

2. State Key Laboratory of Satellite Internet, Beijing 100029, China

Abstract: Communication and navigation symbiosis refers to the coexistence of these signals in the satellite ecological environment. For single-function low-orbit satellite constellations for positioning or communication, it is difficult to quickly perform positioning management when positioning or communication signals are unavailable. The extended Kalman filter (EKF) algorithm was proposed to solve the location of the opportunity signals of LEO communication navigation symbiosis constellations, breaking through the dependence of location management on a single navigation system. Firstly, the basic principle of Kalman filter was introduced, and a Kalman filter location management algorithm based on opportunity signal combining with the positioning management algorithm of LEO satellite constellation was proposed. Secondly, the advantages of this algorithm were analyzed, including improving positioning accuracy, improving positioning efficiency, improving positioning stability, etc. Finally, experiments were carried out to verify the effectiveness of the algorithm. The results show that the algorithm can effectively improve the positioning accuracy, efficiency and stability, and provides an effective solution for LEO communication navigation symbiosis constellation location management.

Key words: global navigation satellite system, communication and navigation symbiosis, location management, signal of opportunity, power spectral density, inertial-navigation system, extended Kalman filter

0 引言

共生是自然界中一种普遍存在的现象,它描述了不同物种之间相互依存、相互受益的关系。生物学中的共生现象启发了人们对于技术领域中新兴概念的思考,尤其是在卫星通信和导航领域。近年来,随着低轨卫星技术的迅猛发展,通导共生成为一种备受关注的研究方向。

传统的卫星通信和导航系统是独立运作的,它们通过专用设备和频段提供通信和导航服务。然而,随着技术的进步和需求的变化,人们对于更高效、更灵活的解决方案提出了更高的期望。这就引出了卫星通信和导航共生体的概念,即将通信和导航功能融合到同一卫星或星座上,使其能够同时提供通信和导航服务。

与传统的通导一体化不同,通导共生强调的是卫星系统与环境的相互作用。在通导共生中,卫星系统不仅是被动地接收和传输信号,而是通过与周围环境进行交互,利用环境中的机会信号实现位置管理功能。这种基于机会信号的定位管理方法具有很大的潜力,可以提供更高的定位精度和更广阔的覆盖范围。

随着低地球轨道(low earth orbit, LEO)通信星座的发展,应用通导共生的机会信号(communication and navigation symbiosis via signal of opportunity, Com & Nav-SOP)正成为全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的替代定位方式。惯性导航系统(inertial-navigation system, INS)和全球定位系统(global positioning system, GPS)的集成是近几十年来最可靠的导航方法之一。该方法同时利用了 INS 的短期精度和 GPS 的长期鲁棒性。然而, GPS/INS 集成方法的一些重大缺陷导致研究人员将注意力集中在导航机

会信号方法上。GPS/INS 集成的一些主要问题是信号干扰的可能性、对干扰敏感以及在一些密集的城市和室内环境中的不可访问性。

在 3 kHz 和 300 GHz 之间的不同频率范围内有几种机会信号(signal of opportunity, SOP),分为甚高频(very high frequency, VHF)、L 波段、S 波段和 Ka 波段等类别。这些信号在环境中自由存在,而且,它们的可访问性和宽带频率范围使它们成为非 GPS 导航方法的最佳选择。调频(frequency modulation, FM)、电视、Wi-Fi、数字信号广播(digital audio broadcasting, DAB)无线电、长期演进(long term evolution, LTE)信号、蜂窝和 LEO 卫星信号被视为 SOP。与地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)和中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星相比, LEO 卫星距离地球更近,信号更强。使用 LEO 卫星信号进行定位取决于信号覆盖范围和能见度持续时间。每个 LEO 卫星都可以在一段特殊的时间内对接收器可见,因此,在这段可见时间之后,接收器需要等到下一颗卫星可以观测到。因此,对于某些星座,有时接收器看不到卫星。设计多星座 LEO 卫星接收器可以解决卫星的可观测性问题。此外,它可以通过选择合适的测量模型检测基于扩展卡尔曼滤波器(extended Kalman filter, EKF)的多普勒定位方法的最佳多普勒测量。通信和导航多星座覆盖示意图如图 1 所示,可以直观地看出,增加星座数量和观测时间可以保证为基于 EKF 的定位系统提供连续的多普勒测量。

扩展卡尔曼滤波是一种自适应滤波器,可以作为软件定义的多星座接收器。该接收器能够检测可见卫星,并将合适的多普勒测量注入基于 EKF 的定位系统。首先,该方法将通过执行韦尔奇功率谱密度(power spectral density, PSD)分



析检测高空卫星,这称为采集部分。然后,将使用锁相环(phase locked loop, PLL)算法跟踪每个检测到的卫星的多普勒频率。最后,设计了一个测量切换滤波器,用于为多普勒定位架构选择正确的测量。结果表明,该接收机可以同时跟踪2颗卫星的多普勒和多普勒率,并且固定接收机的定位结果表明,与单接收机设计相比,其精度有所提高。

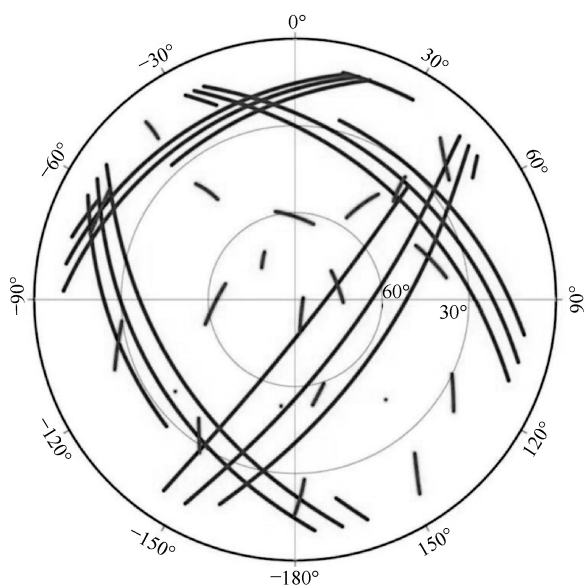


图1 通信和导航星座覆盖示意图

1 多星座机会信号定位理论

在解决接收器设计和定位算法的Nav-SOP问题方面有以下几项研究。在文献[1-2]中,多普勒测量是通过使用载波同步和信号处理设计从LEO卫星的四相移相键控(quaternary phase shift keying, QPSK)信号中获得的。设计了一种使用LTE下行链路信号的机会定位方法,还实现了软件定义无线电(software defined radio, SDR),用于从文献[3]中的LTE信号中提取和跟踪伪距率测量。同样,在地面自动驾驶车辆的导航框架中考虑了LTE信号和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的集成^[4]。SOP辅助INS已在各种GNSS挑战定位应用中进行了试验。通过

自适应最大似然滤波器^[5]和扩展卡尔曼滤波器^[6]估计未知地面SOP的位置。提出了使用到达时间(time of arrival, TOA)和到达时间差(time difference of arrival, TDOA)对SOP伪距测量的观察,用于协作飞行器的导航。

然而,文献[7]对SDR设计进行了深入研究;它完全取决于GNSS信号观测。文献[8]通过设计低地球轨道雷达描述了LEO运动成像,这可以提高科学家研究LEO卫星的研究潜力。此外,文献[9]分析了GNSS和LEO卫星的增强,作为天基监测和Nav-SOP应用有用信息的来源。使用某种LEO卫星研究了许多定位方法,即使用Orbcomm卫星的多普勒定位、铱星和弱信号环境下的铱定位。然而,这些方法可以在短期内提高定位精度;由于每颗卫星的可见持续时间短,长期鲁棒性仍在认真研究中。

本文使用两种不同的估计算法研究了基于多普勒测量的定位方法。首先,使用非线性最小二乘滤波器,其次是EKF估计系统,它们都在文献[9]中进行了研究。文献[10]设计和研究了一种新颖的K波段接收机前端,该接收器用于LEO和GEO之间的卫星间通信,其设计对降低功率泄漏、硬件成本和自动增益校准产生了重大影响。并且,文献[11]研究了一种使用LEO卫星星座的载波相位测量进行导航的方法。在本文中,整数最小二乘问题可以减少定位装置尺寸,本文还研究了LEO卫星时钟的快速收敛,它改进了在实时模式下估计卫星时钟的方法。

设计SDR可以获取LEO卫星的多普勒频移测量结果。文献[12]提出了一种用于卫星通信的SDR,还研究了卫星的多普勒、码率和码相搜索。文献[13]展示了一种新算法,用于估计LEO卫星的下行链路多普勒频率,作为Nav-SOP应用中多普勒定位系统的主要测量方法。此外,文献[14]和文献[15]分别研究了使用LEO卫星的多普勒和多普勒速率进行射频(radio frequency, RF)地理定位和增强多普勒定位算法的对峙轨迹的分析。

本文采用扩展卡尔曼滤波器联合检测算法,验证了精确点定位系统。在 LEO 卫星设计了一个接收器,它可以跟踪多普勒频移并使用单个 LEO 卫星执行定位。尽管这些设计可以提高接收器和 LEO 卫星状态估计的准确性,但所有的实验都非常依赖接收器从采集的信号中提取多普勒测量值的时间。因此,设计多星座接收器不会延长测量的跟踪时间,而且可以在功能时间内提高多普勒定位的准确性。

2 基于 EKF 的多普勒定位模型

对于每 n 个可见卫星,在每个时间步长 k 中从 LEO 卫星接收器获得伪距率测量值。该测量与式 (1) 中的多普勒频率有关。 $\hat{f}_{d_n}(k)$ 是时间步长 k 中第 n 个 LEO 卫星的多普勒频率, f_{c_n} 是第 n 颗卫星的下行中心频率, c 是光速。随后,每个卫星的伪距率测量定义为式 (2)。

$$Z_n(k) = c \frac{\hat{f}_{d_n}(k)}{f_{c_n}} \quad (1)$$

$$z_n(k) = \frac{\dot{\mathbf{p}}_{t,n}^T [\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k)]}{\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k)\|} + c(\dot{\delta}t_r - \dot{\delta}t_{t,n}) + \varepsilon_{t,n}(k) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{p}_r$ 是接收器的 3D 位置矢量, $\mathbf{p}_{t,n}(k)$ 是第 n 个卫星的位置矢量, $\dot{\delta}t_r$ 和 $\dot{\delta}t_{t,n}$ 分别是接收机和卫星的时钟漂移。应该提到的是,电离层和对流层延迟被省略了,这是因为它们在每个测量步骤中的数量可以忽略不计^[16]。因为假设接收器是静止的,可以假设 LEO 卫星的时钟漂移和接收器不随时间变化,因此,状态和测量向量如式 (3) 和式 (4) 所示。

$$\mathbf{x}(k) = [\mathbf{p}_r^T \dot{\delta}t_r \dot{\delta}t_{t,1}, \dots, \dot{\delta}t_{t,n}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{z}(k) = [z_1(k), \dots, z_n(k)]^T \quad (4)$$

由于转移矩阵是作为 $(n+4)$ 维单位矩阵获得的,因此状态向量和误差协方差矩阵的 EKF 时间更新方程分别遵循 $\mathbf{x}_k(k+1) = \mathbf{x}_k(k) + \mathbf{R}$ 和 $\mathbf{P}_k(k+1) = \mathbf{P}_k(k) + \mathbf{Q}$ 。EKF 方程由式 (5) 和式 (7) 给出,状态 $\mathbf{x}_k$ 的迭代计算方程如式 (6) 所示,其

中 $\mathbf{Q}$ 是过程噪声协方差, $\mathbf{R}$ 是观察噪声协方差, $\mathbf{K}$ 是标准卡尔曼增益。

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}_k(k+1) \mathbf{H}^T(k+1) \cdot [\mathbf{H}(k+1) \mathbf{P}_k(k+1) \mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1)]^{-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_{k+1}(k+1) = \mathbf{x}_k(k+1) + \mathbf{K}(k+1) [\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}(k+1) \mathbf{x}_k(k+1)] \quad (6)$$

$$\mathbf{H}(k+1) = [\mathbf{h}(k+1) c \cdot \mathbf{I}_{1 \times 1} - c \cdot \mathbf{I}_{n \times n}] \quad (7)$$

这里, $\mathbf{H}$ 是测量矩阵, $\mathbf{I}$ 是单位矩阵,由其索引定义。为了更好地理解测量雅可比矩阵 $\mathbf{H}$,其扩展形式如式 (8) 和式 (9) 所示。

$$\mathbf{h}(k+1) = [\mathbf{h}_1^T(k+1), \dots, \mathbf{h}_n^T(k+1)]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{H}(k+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(k+1) & c & -c & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{h}_1(k+1) & c & 0 & -c & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \mathbf{h}_n(k+1) & c & 0 & 0 & \dots & -c \end{bmatrix}_{n \times (n+4)} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{h}_n(k+1)$ 定义如式 (10) 和式 (11) 所示,此处静止接收器的速度是零向量。

$$\mathbf{h}_n^T(k+1) = -\mathbf{h}_{v,n}^T(k+1) + \mathbf{h}_{p,n}^T(k+1) \cdot \mathbf{h}_{v,n}(k+1) \cdot \mathbf{h}_{p,n}^T(k+1) \quad (10)$$

$$\mathbf{h}_{p,n}(k+1) = \frac{\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k+1)}{\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k+1)\|} \quad (11)$$

$$\mathbf{h}_{v,n}(k+1) = \frac{-\dot{\mathbf{p}}_{t,n}(k+1)}{\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k+1)\|}$$

将式 (10) 和式 (11) 合并得到 $\mathbf{h}_n^T(k+1)$ 的完整形式。

$$\mathbf{h}_n^T(k+1) = \frac{\dot{\mathbf{p}}_{t,n}(k+1)}{\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k+1)} - (\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k+1)) \cdot \frac{\dot{\mathbf{p}}_{t,n}^T(k+1) [\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k+1)]}{\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_{t,n}(k+1)\|^3} \quad (12)$$

若考虑接收器的处理速度,上述 EKF 方程可以扩展到移动地面或航空器中的动态接收器。测量噪声被建模为方差为 2、均值为 0 的随机高斯白噪声。此外,选择协方差矩阵 $\mathbf{P}(0)$ 的初始值,其对角线上具有噪声方差;选择一个小正值作为过程 and 测量噪声矩阵的协方差。



3 实现的架构

在所提系统中,测量矩阵的类型和维度由 EKF 模式切换块确定。在从接收机获得所有多普勒频率之后,所述切换块向所确定的 EKF 系统发送 0 或 1 二进制值选择经调整的 EKF。由于每颗卫星在一段

时间后都是不可见的,测量的次数可能会随时间而变化,因此该系统完全取决于卫星能见度 and 测量次数。EKF 模式切换块跟踪测量结果并修改 EKF 系统。所提多星座 LEO 卫星接收器架构如图 2 所示,为基于 EKF 的多普勒定位的切换模式,它可以不完全依赖 GNSS 的 LEO 卫星定位系统。

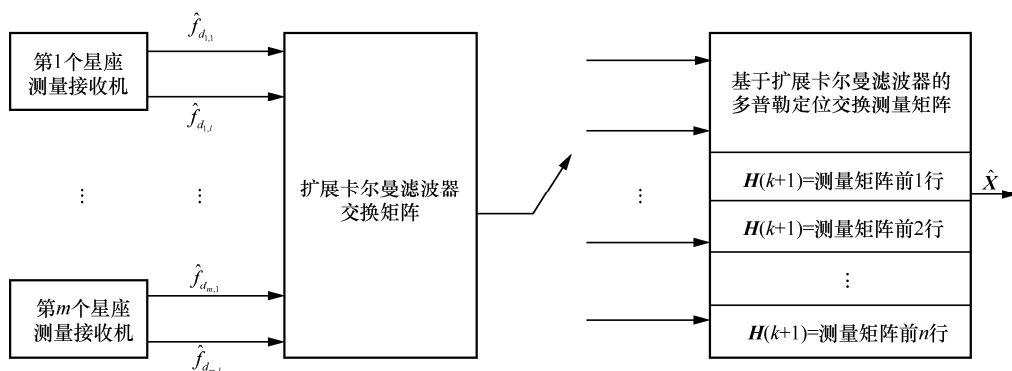


图2 所提多星座 LEO 卫星接收器架构

4 仿真结果

通过 2 MHz 的采样频率,对 3 个可见星座 GPS、北斗和铱星系统(记为星座 A、B、C)的样本进行仿真,验证所设计的多星座接收器的性能。该实验是使用 Blade RF 多输入多输出(MIMO)和软件定义无线电(SDR)进行的,用于记录来自可见卫星的数据。一个 SDR 通道被分配给 GPS,中心频率为 137.5 MHz,另一个通道被确定用于中心频率为 1 626.25 MHz 的铱星。GPS 信号使用双频 VHF/UHF 移动天线,同时为第 2 个通道选择铱星天线。在仿真中,通过开源 SGP4 模拟器跟踪和模拟它们的位置,3 个星座运行轨道如图 3 所示。B 通道完全需要使用射频带通滤波器,C 采用超低通道的噪声放大器。

环形警报和第四纪消息的平均突发带宽为 30~35 kHz。此外,与环形警报相比,消息突发具有更高的幅度。每个卫星的多普勒跟踪环路可以通过简单计算获得的频率和确定的频率之间的

差异初始化。此外,A 星座的多普勒跟踪循环为每次爆发的持续时间内是连续的。因此,C 的环形警报和消息突发的初始多普勒值分别为 30.32 kHz 和 30.30 kHz,B 的初始多普勒值分别为 29.55 kHz 和 29.62 kHz。同样,对于 C 星座,考虑使用较低频带频率进行定位,初始多普勒值约为 -2.456 4 kHz。位置管理中 EKF 估计值与实际值、测量值的对比如图 4 所示,显示了在 30 s 内采集 B 信号后多普勒跟踪模块的结果,结果被用于多普勒定位的 B 星座的伪距率测量。从图 4 中可以看到,多星座 EKF 估计值、测量值与实际值的位置,相对于测量值,EKF 估计值更接近于实际值。

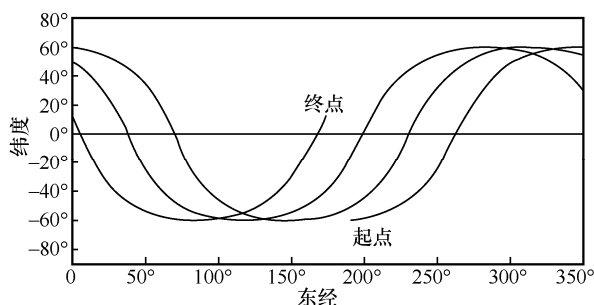


图3 3个星座运行轨道

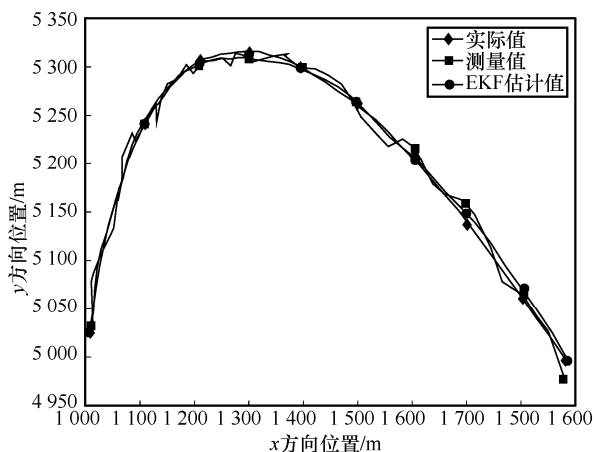


图4 位置管理中EKF估计值与实际值、测量值的对比

不同时刻因多普勒效应产生的位置偏差如图5所示,展示了从A星的单纯形爆发中提取的多普勒频移点。每个单工信号的持续时间为90 ms,因此在30 s的实验后,环形警报和第四纪消息爆发都获得了大约72个多普勒点。多普勒跟踪系统跟踪每个突发持续时间的多普勒频移,最后,将每个点计算为90 ms内多普勒的平均值。B星座的测量是连续的,相比之下,A星座的测量基于爆发持续时间。插值法用于A星座的多普勒测量,然后使用相同的采样频率同步两个星座的测量。

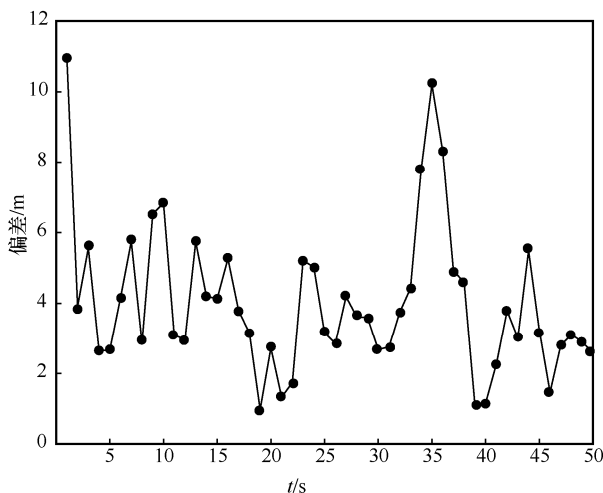


图5 不同时刻因多普勒效应产生的位置偏差

图5显示采用本方案卫星星座A、B、C是相互独立的,它们可以在不依赖GNSS信号,即在

没有GPS或北斗定位信号下,利用其他LEO卫星星座进行定位和导航,定位精度一般在6 m内。若有更多的机会信号,如地面无线信号,还可以精确到2 m内。

5 结束语

本文设计了扩展卡尔曼滤波的机会信号接收器,用于低轨卫星多星座的定位管理。该接收机的结构兼容于使用LEO卫星SOP进行多普勒定位。由于低地球轨道卫星的覆盖范围和长期可见性,应用导航机会信号作为GNSS导航的一个重要替代方案成为关键问题和难点。首先设计多星座接收器,利用各种LEO卫星的伪距速率测量。由于伪距测量可以利用多种星座的机会信号,因此它可以使测量更加可靠。其次将导航SOP与惯性导航集成,以应对GNSS难以访问的情况。

在所提架构中,多个天线可用于从不同星座获取LEO卫星信号。对于两颗以上的卫星,必须使用软件定义无线电,以更高的中心频率同时记录数据。该接收机设计用于检测发射中心频率的卫星,并识别基于突发的卫星(如铱星)的突发。对于各种低轨卫星,多普勒跟踪遵循具有特殊采样频率的测量。接收机测量的多普勒定位的精度完全取决于初始值和EKF参数。该系统可用于低轨惯导集成应用、协作多星座导航设计和定时系统。EKF可用于估计低轨卫星的位置和速度以及接收器的状态。

利用实测的地面观测数据和仿真的LEO地面观测数据,验证了基于EKF联合估计的多星座接入,对定位管理性能具有显著的增强作用,收敛时间缩短,定位精度提升。下一步研究使用高度计或其他辅助测量,深入比较使用各种环路滤波器和鉴相器的架构,对GNSS-SOP-INS集成,在许多室内和室外定位和定位系统中的LEO SOP,通过这些措施可进一步提高导航及定位的精度。



参考文献:

- [1] YANG Y F, LIE J P, QUINTERO A. Low complexity implementation of carrier and symbol timing synchronization for a fully digital downhole telemetry system[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1150-1153.
- [2] RICE M, DICK C, HARRIS F. Maximum likelihood carrier phase synchronization in FPGA-based software defined radios[C]//Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2002: 889-892.
- [3] SHAMAEI K, KHALIFE J, KASSAS Z M. Exploiting LTE signals for navigation: theory to implementation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2173-2189.
- [4] MAAREF M, KHALIFE J, KASSAS Z M. Integrity monitoring of LTE signals of opportunity-based navigation for autonomous ground vehicles[C]//Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), 2018: 2456-2466.
- [5] KASSAS Z M, GHADIOK V, HUMPHREYS T E. Adaptive estimation of signals of opportunity[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), 2014: 1679-1689.
- [6] MORALES J J, ROYSDON P F, KASSAS Z M. Signals of opportunity aided inertial navigation[C]//Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), 2016: 1492-1501.
- [7] MORALES J J, KHALIFE J, KASSAS Z M. Collaborative autonomous vehicles with signals of opportunity aided inertial navigation systems[C]//Proceedings of the 2017 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2017: 80-818.
- [8] MORALES J J, KASSAS Z M. Distributed signals of opportunity aided inertial navigation with intermittent communication[C]//Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017), 2017: 2519-2530.
- [9] MORALES J, KASSAS Z M. Event-based communication strategy for collaborative navigation with signals of opportunity[C]//Proceedings of 2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Piscataway: IEEE Press, 2019: 548-553.
- [10] LANGER M, TROMMER G F. Multi GNSS constellation deeply coupled GNSS/INS integration for automotive application using a software defined GNSS receiver[C]//Proceedings of 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1105-1112.
- [11] SARABANDI K, KELLNDORFER J, PIERCE L. GLORIA: geostationary/low-earth orbiting radar image acquisition system: a multi-static GEO/LEO synthetic aperture radar satellite constellation for Earth observation[C]//IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477). Piscataway: IEEE Press, 2004: 773-775.
- [12] MENG Y S, BIAN L, HAN L, et al. A global navigation augmentation system based on LEO communication constellation[C]//Proceedings of 2018 European Navigation Conference (ENC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 65-71.
- [13] MORALES J J, KHALIFE J, ABDALLAH A A, et al. Inertial navigation system aiding with orbcomm LEO satellite Doppler measurements[C]//Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), 2018: 2718-2725.
- [14] TAN Z Z, QIN H L, CONG L, et al. New method for positioning using IRIDIUM satellite signals of opportunity[J]. IEEE Access, 2019(7): 83412-83423.
- [15] TAN Z Z, QIN H L, CONG L, et al. Positioning using IRIDIUM satellite signals of opportunity in weak signal environment[J]. Electronics, 2019, 9(1): 37.
- [16] LEVANON N. Instant active positioning with one LEO satellite[J]. Navigation, 1999(46): 87-95.

[作者简介]



沈洁 (1974-), 男, 博士, 北京零重空间技术有限公司正高级工程师, 主要研究方向为无线通信、光通信、卫星通信、信息系统、微电子和量子信息等。

刘晖 (1968-), 男, 博士, 卫星互联网国家重点实验室教授、博士生导师, 主要从事高精度卫星导航定位理论方法、连续运行参考站网络 (CORS) 理论与技术、国际通用数据标准、信号体制核心专利等方面的教学与研究工作, 主要研究方向为网络 RTK 定位技术 (NETRTK)、各类差分技术的标准化 (RTCM)、信息网络及连续运行参考站网络的建设、测试与使用、信号体制核心专利研究等。

饶建兵 (1988-), 男, 博士, 卫星互联网国家重点实验室高级工程师, 主要从事卫星互联网系统设计工作。

贺泉 (1984-), 男, 博士, 卫星互联网国家重点实验室高级工程师, 主要从事卫星互联网系统设计工作。

本立言 (1989-), 男, 博士, 卫星互联网国家重点实验室高级工程师, 主要从事卫星互联网系统设计工作。

王治中 (1981-), 男, 博士, 北京零重空间技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星、GIS、遥感、物联网、计算机和大数据等。

熊瀛 (1980-), 女, 北京零重空间技术有限公司工程师, 主要研究方向为数据网、IP 网、发射场地面通信系统、机载通信系统、卫星通信系统和卫星测控等。