

# 构建微型定位导航授时体系, 改变 PNT 格局

尤政, 马林

清华大学精密仪器系, 北京 100084

**摘要** 定位导航授时(PNT)是关乎国家战略的军民两用技术。传统的卫星导航系统易受干扰和遮挡, 惯性导航存在误差积累问题, 其提供的PNT服务均存在固有缺陷。以MEMS技术为基础的芯片原子钟和微惯性测量组合, 与卫星导航技术相结合, 形成微型定位导航授时单元。微型定位导航授时单元以精确的芯片原子钟为时钟基础, 发播定位导航授时信号, 搭建PNT网络。微型定位导航授时单元可以由微纳卫星、无人机等载体携带, 数量可选、布局能控、组网灵活, 克服了传统PNT存在的问题, 改变PNT格局。

**关键词** 微型定位导航授时单元; PNT; MEMS; 组网

**中图分类号** V448.22<sup>+</sup>4

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.12.019

## Construction of a micro positioning navigation and timing system: A change of the pattern of PNT service

YOU Zheng, MA Lin

Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** The positioning navigation and timing (PNT) is a dual-use technology which concerns the national strategy. The traditional global navigation satellite system is susceptible to the interference and the shelter and the inertial navigation error is accumulated. Based on the MEMS technology, combining the chip-scale atomic clock and the MEMS inertial measurement unit with the receiver of the global navigation satellite system, a micro positioning navigation and timing unit is formed. The atomic clock of the unit provides the precision clock signal, the unit broadcasts the positioning navigation and timing signal and the PNT nets are constructed. The units can be carried by micro-satellites or UAVs. The number of the units for the micro positioning navigation and timing system can be freely chosen and the arrangement can be freely configured. The micro positioning navigation and timing system can overcome the problems of the traditional PNT methods and change the pattern of the PNT.

**Keywords** micro positioning navigation and timing unit; PNT; MEMS; net

定位导航授时(positioning, navigation and timing, PNT)是描述时间和空间的关键技术。随着时代的发展, 对PNT的依赖超过了任何历史时期, “什么时间在哪儿?”是人们最关心的问题之一。PNT技术服务于国民经济、国家安全和军事领域, 是综合国力和国际地位的战略标志。美国、俄罗斯、欧盟以及中国等都先后制定了国家PNT发展规划, 建立和完善本国的PNT体系。

全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)是应用最广泛的PNT技术。GNSS以人造地球卫星作为导航平台, 为全球陆、海、空、天各类军民载体提供全天候、高精度的位置、速度和时间信息, 因而又被称为天基定位、导航和授时系统。卫星导航定位系统及其增强型系统构成一个整体的GNSS系统。典型的天基系统包括美国的GPS(global positioning system)、俄罗斯的GLONASS(global navi-

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-04-23

作者简介: 尤政, 教授, 中国工程院院士, 研究方向为微纳卫星及微米纳米技术, 电子信箱: yz-dpi@mail.tsinghua.edu.cn; 马林(共同第一作者),

博士研究生, 研究方向为微惯性测量及定位导航授时技术, 电子信箱: malin10@mails.tsinghua.edu.cn

引用格式: 尤政, 马林. 构建微型定位导航授时体系, 改变PNT格局[J]. 科技导报, 2015, 33(12): 116-119.

gation satellite system)、欧盟的 Galileo 及中国的北斗等<sup>[1-4]</sup>。增强系统可分为两类,一类是利用地球静止或者同步卫星建立的星基增强系统(satellite-based augmentation system, SBAS);另一类是陆基增强系统(ground-based augmentation system, GBAS),如美国海事差分 GPS (maritime differential GPS, MDGPS)和局域增强系统(local area augmentation system, LAAS)及澳大利亚的陆基区域增强系统(ground-based regional augmentation system, GRAS)等<sup>[5]</sup>。

虽然 GNSS 提供的 PNT 服务具有全天候、无误差积累等优势,但 GNSS 卫星距离地面上万公里,且发射功率受限于卫星平台能量收集,无线电信号传输到地面时已非常微弱<sup>[6]</sup>。因此 GNSS 系统无法在物理遮挡(如自然峡谷、城市峡谷、地下、室内、水下等)、电磁干扰(无意干扰、主动干扰)、高动态(快速运动载体)等场合提供有效的 PNT 服务。美国联邦航空局的 GPS 干扰实验显示,使用 1 W 的干扰机可以使 200 km 内的接收机无法正常工作<sup>[7]</sup>。2011 年 12 月,美军一架 RQ170 无人机在与阿富汗接壤的伊朗城市卡什马尔上空执行任务时,被伊朗电子战部门捕获。伊朗工程师先使用大功率 Ku 频段干扰信号,使得无人机通信异常,使其只能启动自动驾驶功能返航,伊朗人又给它发送了假的 GPS 信号,使其降落在设定地点<sup>[8]</sup>。

获取在轨卫星的轨道信息后,反卫星导弹、激光武器及强电磁脉冲可以轻易致盲或摧毁卫星。1959 年美国已经开展了反卫星系统演示,1968 年前苏联实验了第一种反卫星武器,1970 年日本也掌握了反卫星技术。反卫星技术对 GNSS 造成极大的威胁,可导致局部或者整个 PNT 网络的瘫痪。

GNSS 的脆弱性使得 PNT 服务不能随时随地获取,尤其是军事应用,敌方可能完全具备阻断己方 GNSS 信号或者破坏卫星的能力,造成 PNT 服务局部中断。

## 1 微型定位导航授时体系的提出

美国最早提出、建成并成功应用 GNSS,为解决 GNSS 脆弱性产生的 PNT 服务受限问题,美国《国家 PNT 体系执行计划》提出了若干指导意见,其宗旨是整合多种可用的 PNT 资源,灵活组合、互为冗余、优势互补,弥补单一系统存在的问题和缺点,提供可用性、完好性、强健性更好的 PNT 服务。《国家 PNT 体系执行计划》中提出自主导航是解决 GNSS 脆弱性、提高 PNT 服务质量的重要方法,以高精度时钟、惯性测量单元与 GNSS 组合是构建自主导航的主要技术途径。

随着 MEMS 技术的发展,使得芯片级原子钟(chip scale atomic clock, CSAC)和 MIMU (MEMS inertial measurement unit)逐渐成熟,性能不断提升,尺寸、重量、功耗和成本等指标大幅度改善。如,CSAC 秒稳定度达到  $10^{-10}$ ,MEMS 陀螺零偏稳定性达到  $1^\circ/\text{h}$ ,MEMS 加速度计零偏稳定性达到 0.1 mg。早在 2007 年美国空间与海洋战场系统中心的 Randy Rollo 提出了采用 CSAC、MIMU 及 GNSS 构建套件的设想<sup>[9]</sup>,如图 1 所示。Randy Rollo 认为使用 CSAC 嵌入 GNSS 接收机,集

成 MEMS IMU (inertial measurement unit),形成一个组合,可以帮助军队在恶劣环境下获取定位和时间信息。美国空间与海洋战场系统中心是美军核心保密部门,其研究进展和成果从未公开发表。2010 年 1 月,美国国防部先进项目研究局(defense advanced research projects agency, DARPA)启动了定位导航与授时微技术计划,重点发展芯片原子钟、高精度微惯性测量单元技术<sup>[10-15]</sup>,如图 2 所示。

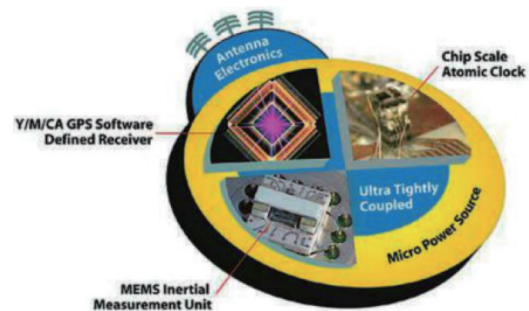


图 1 Randy Rollo 提出的 CSAC、MIMU、GNSS 套件示意  
Fig. 1 Schematic diagram of CSAC, MIMU, GNSS Suit designed by Randy Rollo

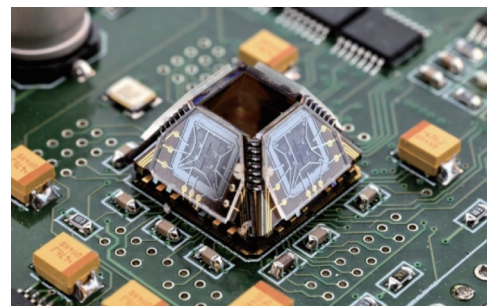


图 2 DARPA 提出的 MicroPNT  
Fig. 2 MicroPNT proposed by DARPA

原子钟可以提供高精度的原子频率标准,是人类能研制的最高精度的频标<sup>[16]</sup>。原子钟利用原子或分子内部能级间的量子跃迁现象,将跃迁谱线频率作为参考标准,对本振信号进行锁定,或者直接利用原子自发辐射产生的振荡信号作为时间参考<sup>[17]</sup>。原子能量具有量子化特点,原子跃迁所发射或吸收的电磁波频率非常稳定。2002 年,美国国家标准局(NIST)利用 MEMS 工艺成功研制体积约  $1 \text{ cm}^3$  的 CPT (coherent population trapping) 原子钟物理部分,NIST 将这种原子钟命名为 CSAC (芯片级原子钟)。该 CSAC 功耗小于 120 mW、体积  $40.6 \text{ mm} \times 35.5 \text{ mm} \times 11.4 \text{ mm}$ ,1 s 短时稳定性小于  $1.5 \times 10^{-10}$ ,10 s 短时稳定性小于  $5 \times 10^{-11}$ 。CSAC 研制成功并实现商品化,为原子频标的广泛应用提供了极大的便利<sup>[18]</sup>,图 3 为美国迅腾公司生产的 SA.45s 芯片级原子钟。对于 PNT 领域,采用 CSAC 原子频率基准替代传统晶振,不仅可提高授时精度,还可为定位系统带来诸多优势。



图3 美国迅腾公司生产的SA.45s芯片级原子钟  
Fig. 3 CSAC SA.45s manufactured by Symmetricom

惯性导航系统建立在牛顿经典力学定律的基础之上,利用加速度计和陀螺仪通过坐标变换和积分算法确定载体的位置、速度和姿态。惯性导航系统一旦获取运载体初始位置,不需从运载体传送信号或者接收信号,即可通过自身系统完成定位导航功能,具有非常优异的自主性和隐蔽性。捷联惯性导航系统(Strap-down inertial navigation system, SINS)是1970年以来伴随着军事需求和微型电子技术的发展而兴起的一项先进技术,与平台惯性导航系统相对应,SINS直接将惯性器件固联于载体,直接敏感载体的加速度和角速度信息,导航计算机作为数字平台,输出导航信息<sup>[19]</sup>,SINS具有短时精度高、数据更新快和输出信息全等优点。随着微机电技术的出现和迅猛发展,MEMS陀螺仪和加速度计在体积、功耗、重量、成本等方面有着巨大的优势,由MEMS陀螺仪、加速度计构成的惯性组合(MEMS inertial measurement unit, MIMU)已广泛应用于多种定位导航平台。

为了弥补和克服GNSS脆弱性,融合高精度时钟、惯性组合和GNSS,构建微型定位导航授时单元(Micro positioning navigation and timing unit, MicroPNTU),由MicroPNTU构建新型PNT体系。考虑到性能、功耗、体积、重量、成本及技术成熟度因素, MicroPNTU的时钟采用芯片原子钟(CSAC), MicroPNTU的惯性组合采用MIMU。该单元不仅可以为自身提供定位、导航和时间信息,而且发射类GNSS信号,多个MicroPNTU携带者可以与太空中的GNSS卫星共同构建新型PNT网络,为其他用户提供定位、导航和授时服务,称为微型定位导航授时体系(Micro positioning navigation and timing system, MicroPNTS)。

与GNSS在轨卫星不同, MicroPNTU可以由人员、车辆、飞机、微小卫星等载体携带,其数量可选、布局能控、灵活易用。MicroPNTS可以克服区域干扰、部分导航卫星失效、物理遮挡等问题,打破传统PNT技术的篱笆,甚至改变整个战场的态势。

## 2 微型定位导航授时体系的发展思路

加快微型定位导航授时体系的发展是增强中国PNT体系整体水平的重要途径。如图4所示,将微型定位导航授时体系的发展划分为4层:基础元件集成制造层、功能耦合层、

单元组网层、系统应用层。4个层次之间逐渐递推,前一层为后一层提供基础,后一层为前一层明确技术要求。

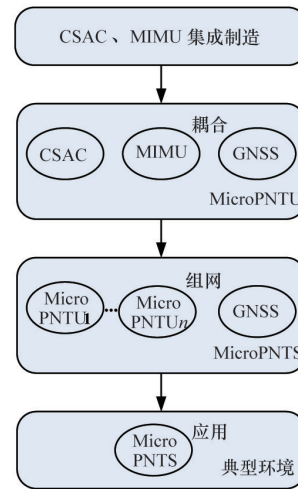


图4 微型定位导航授时体系发展思路  
Fig. 4 Development steps of MicroPNTS

1) 基础元件集成制造层——提供基础器件。微型定位导航授时体系的建立首先以基础元器件为基础,芯片级原子钟、微惯性测量组合是微型定位导航授时单元的核心组成部分。随着MEMS技术的发展,国内在CSAC和MIMU的设计、制造方面取得了不少成果,但都仅限于分离传感形式。对SWaP(size, weight and power)要求更为苛刻的情况下,利用MEMS、TSV(through silicon vias)和三维集成技术,将CSAC和MIMU集成制造。

2) 功能耦合层——形成微型定位导航授时单元。图5给出了CSAC、MIMU和GNSS耦合关系示意。CSAC具有较好的频率稳定度,为MicroPNTU提供统一的时钟信号。CSAC在相对长的时间内可以推演出准确的时间信息,时间信息可以帮助GNSS捕获,尤其是长码的捕获。CSAC的时间信息还可以改变传统的GNSS定位方程,发挥虚拟卫星的作用,改善DOP(dilution of precision)。GNSS的1 PPS(pulse-per-second)时钟信息修正CSAC的长期积累误差。MIMU提供载体的运动加速度和速度信息,辅助GNSS捕获和跟踪,改善GNSS在高动态情况下的鲁棒性。CSAC、MIMU和GNSS以紧耦合模式构建组合滤波方程,修正MIMU的测量误差。

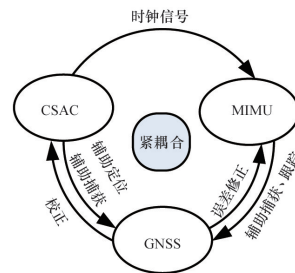


图5 CSAC、MIMU与GNSS之间的耦合关系  
Fig. 5 Coupled relationship between CSAC, MIMU and GNSS

3) 单元组网层——构建微型定位导航授时体系。MicroPNTU在精确的原子钟驱动下,发射定位导航授时信号。在自身位置精确已知的情况下, MicroPNTU为其他用户提供PNT服务。该部分的研究内容如图6所示,需要探索单点动态测量分析、组合测量分析、精度因子分析、优化布局以及互组网问题。

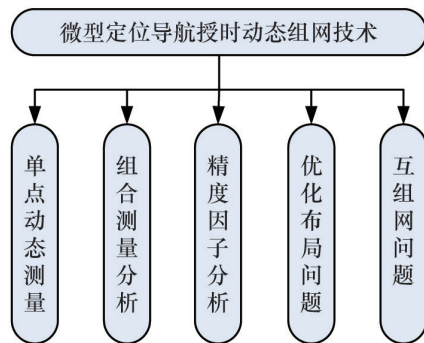


图6 微型定位导航授时组网技术研究内容

Fig. 6 Study topics of MicroPNT Net

4) 系统应用层——验证微型定位导航授时体系。研究MicroPNTS在典型环境,尤其是协同作战系统,实现网络同步的方法。运用Petri网等现代系统理论和工具建立协同模型并仿真计算,演示验证微型定位导航授时体系的作用和价值,为该体系的发展提供依据。

### 3 展望

微型定位导航授时体系是MEMS技术在PNT领域的一项重大应用,必定改变PNT的格局。中国北斗二代卫星导航定位系统逐步建成了天基PNT,微型定位导航授时与天基PNT共同构建鲁棒PNT大体系,提供全天候、抗干扰、高精度的军民两用PNT服务。

#### 参考文献(References)

- [1] 郭丽红, 李洲. 美国国家星基定位、导航与授时概况[J]. 国际太空, 2013(4): 50-52.  
Guo Lihong, Li Zhou. The general situation of America national satellite based positioning, navigation and timing[J]. Space International, 2013(4): 50-52.
- [2] 胡安平, 梁尔冰. PNT体系研究及验证[J]. 现代导航, 2012(6): 395-400.  
Hu Anping, Ling Erbing. PNT architecture study and test[J]. Modern Navigation, 2012(6): 395-400.
- [3] 廖春发. 美国PNT体系结构的现状与发展趋势[J]. 卫星应用, 2011(2): 69-76.  
Liao Chunfa. Current situation and development trend of PNT system structure USA[J]. Satellite Application, 2011(2): 69-76.
- [4] 曹冲. 全球导航卫星系统体系化发展趋势探讨[J]. 导航定位学报, 2013(1): 72-77.

2013(1): 72-77.

- Cao Chong. Discussion on the development trend of Navigation Satellite System Global[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013(1): 72-77.
- [5] 谢钢. 全球导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.  
Xie Gang. Principles of GNSS: GPS, GLONASS, and Galileo[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [6] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: Principles and application [M]. 2nd ed. Norwood, MA: Artech House, 2006.
- [7] Gao G X. DME/TACAN interference and its migration in L5/E5 bands [C]. ION Global Navigation Satellite Systems Conference 2007, Fort Worth, Texas, September 25-28, 2007.
- [8] Qi H, Moore J B. Direct Kalman filtering approach for GPS/INS integration [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 687-693.
- [9] Rollo R. Military & Government—Navigation in a Nugget—SPAWAR leverages new chip—scale atomic clock—The first GPS receiver in the world to incorporate a chip—scale atomic clock will transform future[J]. GPS World, 2007, 18(9): 56-59.
- [10] Lutwak R. Micro—technology for positioning, navigation, and timing towards PNT everywhere and always[C]. 2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS), Laguna Beach, CA, USA, February 25-26, 2014.
- [11] Shkel A M. Precision navigation and timing enabled by microtechnology: Are we there yet[C]. IEEE Sensors 2010 Conference, Waikoloa, USA, November 1-4, 2010.
- [12] Fisher K A, Raquet J F. Precision position, navigation, and timing without the global positioning system[J]. Air & Space Power Journal, 2011, 25(2): 24-33.
- [13] Groves P D. The PNT boom: Future trends in integrated navigation[J]. Inside GNSS, 2013, 8(2): 44-49.
- [14] 文苏丽, 张国庆. 美国GPS受限条件下导航定位技术的新发展[J]. 战术导弹技术, 2014(6): 016.  
Wen Suli, Zhang Guoqing. The technology progress of PNT in GPS limited conditions[J]. Tactical Missile Technology, 2014(6): 016.
- [15] 李冀. 国外提升卫星信号在拒止环境下导航定位能力的新技术[J]. 导航定位学报, 2013, 1(2): 55-59.  
Li Ji. New technologies developed for promoting PNT capability in GPS denial environment[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(2): 55-59.
- [16] 杨俊, 单庆晓. 卫星授时原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 130-133.  
Yang Jun, Shan Qingxiao. Satellite timing principle and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 130-133.
- [17] 王义道, 王吉庆, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 236-253.  
Wang Yiqiu, Wang Jiqing, Fu Jishi, et al. The principle of quantum frequency standard[M]. Beijing: Science Press, 1986: 236-253.
- [18] Microsemi Corporation. Quantum™ SA.45s chip scale atomic clock [EB/OL]. [2015-03-15]. <http://www.microsemi.com/products/timing-synchronization-systems/embedded-timing-solutions/components/sa-45s-chip-scale-atomic-clock>.
- [19] Titterton D, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. London: Institution of Engineering & Technology, 2004.

(编辑 陈华姣)