

引文格式:杨元喜,李晓燕.微 PNT 与综合 PNT[J].测绘学报,2017,46(10):1249-1254. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170249.
YANG Yuanxi,LI Xiaoyan.Micro-PNT and Comprehensive PNT[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):
1249-1254. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170249.

微 PNT 与综合 PNT

杨元喜¹,李晓燕²

1. 西安测绘研究所地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安 710054; 2. 31009 部队,北京 100088

Micro-PNT and Comprehensive PNT

YANG Yuanxi¹,LI Xiaoyan²

1. National Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China; 2. 31009 Troops, Beijing 100088, China

Abstract: Comprehensive or integrated positioning, navigation and timing is an obvious developing trend following the global navigation satellite system.This paper summarizes the current status of micro-PNT and its developing requirements. The related key technologies are described and the relationship between comprehensive PNT and micro-PNT is analyzed. It is stressed that the comprehensive PNT needs massive infrastructure construction and investment, however, the micro-PNT aims at the integrated applications of high-tech micro sensors. It is different from the current opinions appeared in the literatures, micro-PNT should include multi GNSS integration and micro components of navigation and timing in order to make the PNT outputs refer to a unified coordinate datum and time scale. Micro-PNT focuses on the personalized micro terminal applications. Except for the miniaturization of each PNT component, micro-PNT aims at the deep integration of the micro sensors, adaptive data fusion and self calibration of each component.

Key words: positioning, navigation and timing (PNT); micro inertial navigation sensor; chip scale atomic clock; sensor integration; data fusion; comprehensive PNT

Foundation support: The National Key Research and Development of China(No. 2016YFB0501700)

摘 要:综合定位导航授时是后 GNSS(全球卫星导航系统)发展的必然趋势。本文侧重梳理微 PNT 发展需求和发展现状,分析与之关联的核心关键技术,论述综合 PNT 与微 PNT 的关系。强调综合 PNT 需要大量基础设施投入与建设,而微 PNT 侧重高技术传感器的集成应用。与现有文献思路不同的是,我们认为,为了实现各类传感器 PNT 输出结果的坐标基准统一和时间尺度一致,微 PNT 应包含多模 GNSS 和芯片级惯性导航和芯片级原子钟等定位定时组件,微 PNT 强调小型化、个性化、组合化服务终端;微 PNT 除各 PNT 组件的小型化外,还包括各组件的深度集成,各类数据的自适应融合和各组件的自主标校;当然,微 PNT 也强调各传感器信息的时空基准的统一。

关键词:定位导航授时;微型惯导组件;芯片级原子钟;传感器集成;数据融合;综合 PNT

中图分类号:P228 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1595(2017)10-1249-06

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0501700)

定位导航授时(positioning navigation and timing,PNT)用户每 5 年翻一番,由于机器人技术和其他移动载体的定位导航授时需求,今后5~10 年内 PNT 用户可能每 2 年翻一番^[1]。尤其是无人机、物联网、移动通信、自动驾驶等加速了 PNT 应用领域的拓展。然而,时至今日,大多数 PNT 用户通常依赖全球卫星导航定位系统

(global navigation satellite system,GNSS),包括中国的北斗(BDS)、美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的伽利略(Galileo)系统等。

海湾战争以来,美国军方开始认识到 GPS 的脆弱性,尤其是在电子环境日益复杂、频谱对抗日益激烈的未来战场环境中,欲确保战场 PNT 的主导权,确保各类平台、载体使用 PNT 的安全,

必须降低对 GPS 的依赖^[2]。

2010 年起,美国交通部和国防部就开启了综合 PNT 架构的谋划与研究^[3],目标是 2015 年前建成美国国家 PNT 新体系^[4]。

其实,GNSS 不仅信号微弱,而且易被干扰,甚至被欺骗,于是取代 GNSS 服务的呼声不绝于耳。是取代还是集成其他系统?一度出现争论。但主流思想是,从体系上建成稳健的 PNT 架构。于是 Parkinson 教授提出 PTA 概念^[5],即预防干扰(protect)、坚韧(toughen)和增强(augment),核心是 GPS 的 PNT 服务具有坚韧性。笔者也提出了综合 PNT 的架构,基本出发点在于采用多 GNSS 融合服务,以便诊断和排斥单一系统的针对性干扰和欺骗,并采用基于不同物理原理的 PNT 信息融合服务,削弱对 GNSS 的依赖^[4]。

综合 PNT 理论上的优越性不得不面临实践上的复杂性,尤其是随着信息源的增加,用户终端传感器的结构会越来越复杂,体积会越来越大,功耗也会随之增大,显然,这不符合大多数用户的要求。大多数移动用户希望 PNT 服务终端具有便携、可嵌入、低能耗、待机时间长等特点。于是,追求小型化的 PNT 集成终端成为综合 PNT 的核心问题之一。

同样在 2010 年,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)启动了微 PNT(micro-PNT)计划,即综合利用定位、导航和授时的微机械设备开发微 PNT 组件^[6]。其实,micro-PNT 不仅应包括微机械技术,还应包括微电子技术;不仅体积“微”,功耗也应“微”;而且必须具备稳健性等性能指标。

中国虽然已建成了北斗一代和北斗二代卫星导航系统,但是中国北斗卫星导航系统与其他 GNSS 信号一样具有脆弱性^[7-10]。本文在综合 PNT 体系架构下,梳理微 PNT 的体系结构,发展现状与趋势,并试图探讨若干关键核心技术,探讨其可能的技术途径。

1 微 PNT 发展现状

在微 PNT 体系发展方面,美国先后启动了 9 个大型集智攻关研究计划。在时钟方面,启动了芯片级原子钟(chip-scale atomic clock,CSAC)和集成微型主原子钟技术(integrated micro primary atomic clock technology,IMPACT);在定位方面,启动了导航级集成微陀螺(navigation

grade integrated micro gyroscope,NGIMG)、微惯导技术(micro inertial navigation technology, MINT)、信息链微自动旋式平台(information tethered micro automated rotary stages, IT-MARS)、微尺度速率集成陀螺(micro scale rate integrating gyroscopes,MRIG)、芯片化微时钟和微惯导组件(chip-scale timing and inertial measurement unit,TIMU)、主动和自动标校技术(primary and secondary calibration on active layer,PASCAL)、惯导和守时数据采集、记录和分析平台(platform for acquisition, logging, and analysis of devices for inertial navigation & timing,PALADIN & T)等。这些研究计划将形成美军微 PNT 体系技术框架。

2011 年《GPS WORLD》刊载文章认为“微技术时代已经到来”^[11]。

1.1 微时钟技术

早在 2002 年 DARPA 就发动 10 多个科研团队对芯片级原子钟(CSAC)进行攻关,起初的目标是,新研微原子钟应该比当时的原子钟小 200 倍以上,功耗减 300 倍,即体积从当时的 230 cm³ 减小到 1 cm³,功耗从 10 W 减小到 30 mW,精度制表位 10⁻¹¹,稳定度指标为 1 μ s/d。直到 2012 年美国才在太空站测试了芯片级原子钟技术,当时的 CSAC 的体积为 15 cm³。尽管有多家公司研发的 CSAC 原型样机已实现体积为 1 cm³ 的目标,并具有交付测试的能力,但离实际应用还存在相当大的差距。

在微型原子钟技术方面,必须攻克固态电子和原子振荡等关键技术^[16]。微时钟系统的质量取决于各组件的时间同步、时钟与其他测量装置的时间同步,以及内部时间传递精度。一般对于中低动态载体导航,内部时间精度应达到 10⁻¹²,对于以时间为参考的测量,则要求达到 10⁻¹³的精度,并要求低功率的时钟和振荡器的长期稳定度要好于 10⁻¹¹ 每月,功耗 1 W^[16]。

在集成型主原子钟技术(IMPACT)方面,已实现了功率低于 250 mW,时间误差小于 160 ns/d 的性能指标。由于主原子钟一般用于提供绝对时标,于是,精度和可靠性有望比芯片级原子钟高两个数量级。未来,可望实现尺寸 5 cm³、功耗 50 mW、频率精度 1 \times 10⁻¹³/h(Allen 方差)、稳定度优于 5 ns/d 的芯片级原子钟。

超小型低功耗的绝对时标主要用于微纳卫星

和微小卫星系统,也可应用于无人水下潜器等。如果超小型低功耗的绝对时标装置嵌入 GNSS 接收机,则可提高 GNSS 接收机的抗干扰、防欺骗能力,因为干扰和欺骗信号主要在时钟方面施加随机误差,导致无线电测距误差增大,引起导航定位的系统偏差。此外,微小时钟在高速信号捕获、通信、监视、导航、导弹引导、敌我识别及电子战中都有重要用武之地。

1.2 微陀螺技术

微陀螺技术是微 PNT 的主攻方向之一。早在 1970 年就有关于原子陀螺的演示,只是那时的原子陀螺非常笨重且昂贵。由于 MEMS 技术的成熟和批量生产,原子陀螺的小型化成为主攻方向。但是,至今为止,基于 MEMS 的原子陀螺产品还不成熟,而且进展缓慢^[12]。

大多数光学陀螺都是基于萨尼亚克(Sagnac)效应研制的,如光纤陀螺和环状激光陀螺。

最初有人设计了硅微电子机械系统(SIMEMS),该系统具有体积小、成本低等优点^[12]。但是这类装置不能测定小的旋转速率,而惯性梯度测量需要测定 $0.001^\circ/\text{h}$ 的微小速率。幸运的是,原子陀螺具有小型化的潜力。原子陀螺可概括分为原子干涉陀螺(atomic interference gyroscope, AIG)和原子自旋陀螺^[13](atomic spin gyroscope, ASG)。

2011 年就有了利用微原子核磁共振进行陀螺仪的研究报道^[14]。其实,自从 1938 年 Isidor Rai 发现核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)后,不少科学家即开始尝试利用 NMR 技术研制陀螺仪。从格鲁曼公司已经封装的微核磁共振陀螺仪的测试结果看,该型微陀螺体积小、稳定性好,性能几乎好于市场上所有微机械陀螺(MEMS)。

半导体光源的利用促进了核磁共振陀螺仪(NMRG)的小型化。由于核磁共振陀螺仪无需机械运动部件,于是,对振动或振荡不敏感,具有高分辨率和高稳定性等特点。可以利用多个具有不同特性的核磁共振组件进行集成,只是在目前的技术状态下,很难实现小型化。

2013 年美国诺斯罗普·格鲁曼(Northrop Grumman)公司演示了一款新型的微原子核磁共振螺旋仪(micro-NMRG)的原理样机,利用原子核自旋功能探测和测量载体旋转。尽管该装置体积很小,但是几乎具有现有光纤陀螺仪的定向性

能,而且该陀螺仪被封装在 10 cm^3 的盒子里^[15]。该螺旋仪的另一个特点是,配备有活动部件,对载体的振动和加速度不敏感。

1.3 微惯导定位技术

在惯性导航定位技术研究方面,DAPAR 开启了 7 个研究计划。

2005 年启动了导航级集成微陀螺(NGIMG)研究,目标是尺寸仅为 1 cm^3 、功耗小于 5 mW 、定向随机游走小于 $0.001^\circ/\sqrt{h}$ 、偏差漂移小于 $0.01^\circ/\text{h}$ 、尺度因子稳定度优于 50 ppm 、测程大于 $500^\circ/\text{s}$ 、 300 Hz 带宽^[11]。导航级集成微型陀螺主要用于小型作战平台。

2008 年美国启动微惯导技术(MINT)研究,旨在开发微型、低功耗导航传感器,具备数小时到数天的自主导航能力。MINT 的目标是体积达到 1 cm^3 (能用于步行导航,如嵌入鞋体),功耗不高于 5 mW ,要求步行 36 h 后精度仍能保持 1 m ,每步速度偏差为 $10\text{ }\mu\text{m/s}$ 。微惯导组件采用直接测量中间惯性变量(速度和距离),如此可以减小加速度计和陀螺仪集成后计算速度和位置带来的累积误差^[16]。

2009 年美国启动信息链微自动旋式平台(IT-MARS),该计划的目的是实施和验证多 MEM 组合的旋转平台性能,为 MEM 组合传感器提供一个旋转自由度(微结构、微传感器本身无旋转)。目标是研制出体积 1 cm^3 、功耗 10 mW 、角度绝对精度好于 0.001° 、满足最大摆动 $10\text{ }\mu\text{rad}$ 、旋转速率 $360^\circ/\text{s}$ 测程范围的 IT-MARS。

2010 年同时启动微尺度速率集成陀螺(MRIG)、芯片级微时钟和微惯导组件(TIMU)、主次标校技术(PASCAL)和惯导守时数据采集、记录与分析平台(PALADIN&T)^[11]。

MRIG 的主要目标是提升惯性传感器的动态测程,以便适应动态载体的大范围机动,动态测程扩大到 $15\text{ }000^\circ/\text{s}$,角度相关的可重复性为 $0.1^\circ/\text{h}$,与偏差相关的漂移可重复度达 $0.01^\circ/\sqrt{h}$,工作温度拓展至 $-55^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$,定向随机游走 $0.001^\circ/\sqrt{h}$ 。

TIMU 主要目标是发展超小型定位和守时综合装置,设计要求该装置体积 10 mm^3 、功耗 200 mW 、圆概率误差(CEP)达 1 nmi/h ,并且有自主导航能力。

PASCAL 的主要目标是减小时钟和惯性传

传感器的长期漂移,以便在无 GNSS 支持的情况下,实现长时间自主导航。于是该装置的自检校功能是研究重点。因为只有当微 PNT 传感器具有自检校功能时,才能弱化惯导和时钟的长期项偏差和系统漂移等累积误差。PASCAL 的偏差稳定度要求提升至 1×10^{-6} ,比现有微惯导 (200×10^{-6})高两个数量级。

PALADIN&T 将发展具有普适性的柔性测试平台。先发展原理型平台,然后发展飞行便携的简化的统一评估方法,并提供早期的野外技术验证。

2012 年,DARPA 启动芯片级组合原子导航(chip-scale combinatorial atomic navigation),简称 C-SCAN 计划,即寻求将不同物理特性的惯性传感器集成到单一的微尺度惯性测量单元(IMU),这也是 DARPA 开展的微 PNT 计划的重要组成部分,其目的是构建自主的、不依赖 GPS 的芯片级微 PNT 系统,能适用于不同军用平台、不同作战环境的载体精密引导,并能适用于中远程导弹的引导^[16]。

C-SCAN 计划的核心是将具有不同物理特性的 PNT 组件集成到单一的微系统(microsystem),不同组件具有互补性。主要目标可以概况为:①将不同高性能固态惯性传感器进行综合,发展综合集成技术,将不同物理原理的各组件集成为一个整体,并实现小型化;②发展相应的数据融合处理方法。

C-SCAN 的首要任务是集成一个多陀螺和多加速度计的单一的惯性测量组件(IMU)。精度指标达到 10^{-4} deg/h,偏差稳定性达到 10^{-6} g,角度随机游走达到 5×10^{-4} deg/ \sqrt{h} ,速度随机游走(VRW)达到 5×10^{-4} m/s/ \sqrt{h} 。尺度偏差 1×10^{-6} ,动态测程达到 1000 g。

C-SCAN 组件具有 3 个旋转轴和 3 个加速度传感器,在恶劣环境下可为军用载体提供定位导航服务。

2 微 PNT 发展的若干关键技术

微 PNT 关键技术主要体现在“微小”、“综合”及“融合”,更强调综合 PNT 服务。一般文献所强调的微 PNT 组件是由微型时钟、微型惯导等单元组成^[1,11,16-17]。笔者认为,微 PNT 不应该排斥 GNSS 组件,因为 GNSS 芯片不但可以实现微小化,而且可以提供外部基准(尽管可能因为信

号遮挡而不连续),于是芯片化的 GNSS 组件可以与微时钟、微陀螺和微惯导组件深度集成。信息源的丰富是实现 PNT 输出信息稳健性的前提。

微 PNT 组件不仅要求体积小,而且要求功耗低,还要求具有生成可靠 PNT 信息的能力,于是微 PNT 涉及顶层设计和机电加工工艺技术。

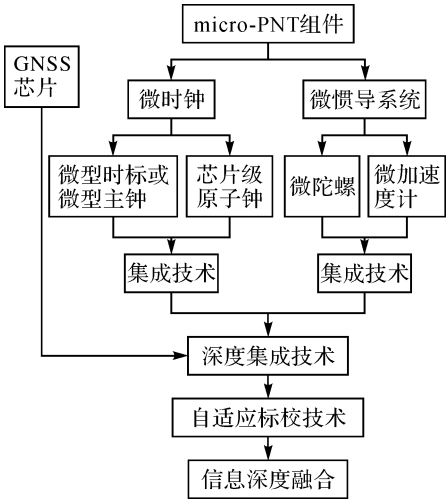


图 1 微 PNT 的体系结构
Fig.1 Architecture of micro-PNT

微 PNT 不仅体现在“微”,即小型化的 PNT,同时也需要“精”,需要“稳”,需要“可靠”。因此,精细的微尺度制造技术只是微 PNT 的核心技术之一,而与之配合的精细优化的整体集成技术和智能的数据处理技术,才能构成完整的微 PNT 技术体系,其中芯片级陀螺仪和芯片级原子钟是其核心中的核心。

(1)“微”要体现优化的设计原理。优化合理的设计,才有可能有精细的制造;优化合理的设计,还涉及后续的体系架构;顶层设计的优化是微尺度制造、微尺度集成的基础。

(2)“微”还要体现精细的制造技术。微尺度制造首先要解决特殊的材料问题,因为“微”很容易造成“不稳”,正常的材料要同时解决“微”与“稳”,经常互相矛盾,因此必须攻克材料和制造工艺方面的问题;材料要满足环境稳定性和适应性,再辅以特殊的制造工艺才能制造出先进可靠的微 PNT 传感器。

(3)“微”还必须具备不同原理的微器件的“深度集成”技术。深度集成应该体现在能共用的单元就应该共用。如多微型时钟组件与多微型惯

性导航组件,就应该设计在同一芯片上,真正实现芯片级 PNT 微组件。PNT 装置的微型化才能便于与其他不同载体的集成或嵌入。

(4) “微”就必须要求各计量器件具备自主标校能力,包括主动标校和被动标校能力。在微器件状态下,各组件的系统误差应该能自动探测、自动标校,尤其能自适应地进行系统误差拟合和纠正,确保多传感器集成后的 PNT 组件处于高稳定可靠的工作状态。

(5) “微”也要求 PNT 各类微器件的输出信息能自适应进行融合^[18]。不同的组件可能具有不同的物理特性,各组件虽有分工,但也互为补充,不同的物理特性可能产生不同的系统误差和有色噪声^[19],因此,顾及各类系统误差补偿和有色噪声补偿的自适应融合算法就显得十分重要^[20-21]。微 PNT 数据融合的第一要素是构建可以互操作的函数模型,该函数模型必须构建以相同的位置向量 \mathbf{X} (position)、相同的速度参数向量 $\dot{\mathbf{X}}$ (velocity)和各类传感器特有的参数向量 \mathbf{S} 共同表示,于是函数模型可以表示成

$$\mathbf{L}_I(t)=f(\mathbf{X}(t),\dot{\mathbf{X}}(t))+g_I(\mathbf{S}_I(t))+e_I \quad (1)$$
式中, $\mathbf{L}_I(t)$ 表示 t 时刻第 $I(I=1,2,\cdots,M)$ 类观测; $f(\mathbf{X}(t),\dot{\mathbf{X}}(t))$ 为 t 时刻位置向量和速度向量的函数; $g_I(\mathbf{S}_I(t))$ 为 I 类观测特有参数的函数,包括特有的系统误差、有色噪声和时间参数等; e_I 为 \mathbf{L}_I 的观测误差。即每一类观测均表示成共同的参数模型和特有的参数模型的叠加。假设 \mathbf{L}_I 的先验协方差矩阵为 $\boldsymbol{\Sigma}_I$,先验权矩阵为 $\mathbf{P}_I=\boldsymbol{\Sigma}_I^{-1}$,则自适应状态参数向量的融合模型可以形式表达成^[18-19,21]

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}} \\ \hat{\dot{\mathbf{X}}} \\ \hat{\mathbf{S}} \end{bmatrix}(t)=\sum_{I=1}^M \alpha_I(t) \mathbf{P}_I(t) h_I(\mathbf{L}_I(t)) \quad (2)$$

式中, $0 \leq \alpha_I(t) \leq 1$ 为 t 时刻 I 类观测的自适应因子,用来调节各类观测对融合参数的贡献; $\mathbf{P}_I(t) h_I(\mathbf{L}_I(t))$ 为观测类 $\mathbf{L}_I(t)$ 对模型参数的贡献形式表达,不同的准则对应不同的 $\mathbf{P}_I(t) h_I(\mathbf{L}_I(t))$ 。如采用最小二乘准则,则有

$$\mathbf{P}_I(t) h_I(\mathbf{L}_I(t))=(\mathbf{A}_I^T(t) \mathbf{P}_I(t) \mathbf{A}_I(t))^{-1} \cdot \mathbf{A}_I^T(t) \mathbf{P}_I(t) \mathbf{L}_I(t) \quad (3)$$

式中, \mathbf{A}_I 为线性化观测方程的系数矩阵。

如果在自适应数据融合过程中能实施对各微 PNT 组件的在线标校,则可减少各类观测量的特

有模型参数,提高 PNT 融合输出结果的可靠性。

3 结束语

“综合 PNT”需要“微 PNT”的支持,否则综合 PNT 将会复杂、笨重、高功耗。而微 PNT 必须解决各组件的优化设计、材料的优选、制造的精密、组件的深度集成、各传感器的实时标校、各传感器输出信息自适应融合。微 PNT 数据自适应融合需要对各类组件的观测数据质量进行实时判断,构造合理的自适应因子,以最佳平衡各类传感器及各类观测对模型参数的贡献。特别需要指出的是,微 PNT 必须包括 GNSS 芯片,有 GNSS 支持的 PNT 可以确保微型传感器输出信息的时空基准的一致性。微 PNT 还必须具备智能化、全天候、全空域的服务能力。

参考文献:

[1] SHKEL A M. Precision Navigation and Timing Enabled by Microtechnology: Larsen M. Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope[C]//APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics Meeting Abstracts, Atlanta: APS 2011.

[2] 李冀,赵利平.美国微定位导航授时技术的发展现状[J].国外卫星导航,2013(3):23-30.

LI Ji, ZHAO Liping. The Development Status of American Micro-PNT[J]. Foreign Satellite Navigation, 2013(3): 23-30.

[3] Department of Transportation and Department of Defense of USA. National Positioning, Navigation, and Timing Architecture Implementation Plan April 2010 [R/OL]. [2017-05-10]. http://ntl.bts.gov/lib/34000/34500/34508/2010_National_PNT_Arch.

[4] 杨元喜.综合 PNT 体系及其关键技术[J].测绘学报,2016,45(5):505-510. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016.20160127.

YANG Yuanxi. Concepts of Comprehensive PNT and Related Key Technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5): 505-510. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016.20160127.

[5] PARKINSON B. Assured PNT for Our Future: PTA. Actions Necessary to Reduce Vulnerability and Ensure Availability [C]//The 25th Anniversary GNSS History Special Supplement. [S.L.]: GPS World Staff, 2014.

[6] DALAL M. Low Noise, Low Power Interface Circuits and Systems for High Frequency Resonant Micro-gyroscopes [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2012.

[7] 杨元喜.国际卫星导航系统的发展及其对我国导航事业的影响[J].测绘通报,1999(9):2-5.

YANG Yuanxi. International GNSS Developments and Their Effects on Chinese Navigation System[J]. Bulletin

of Surveying and Mapping, 1999(9): 2-5.

[8]

杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.

YANG Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6.

[9]

杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献[J]. 科学通报, 2011, 56(21): 1734-1740.

YANG Yuanxi, LI Jinlong, XU Junyi, et al. Contribution of the Compass Satellite Navigation System to Global PNT Users[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(21): 1734-1740.

[10]

杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 72-81.

YANG Yuanxi, LI Jinlong, WANG Aibing, et al. Preliminary Assessment of the Navigation and Positioning Performance of BeiDou Regional Navigation Satellite System[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(1): 72-81.

[11]

SHKEL A M. Microtechnology Comes of Age[J]. GPS World, 2011, 22(9): 43-50.

[12]

GUNDETI V M. Folded MEMS Approach to NMRG[D]. California: University of California, 2015.

[13]

FANG Jiancheng, QIN Jie. Advances in Atomic Gyroscopes: A View from Inertial Navigation Applications[J]. Sensors, 2012, 12(5): 6331-6346.

[14]

LARSEN M, BULATOWICZ M, CLARK P, et al. Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope [C] // APS Division of Atomic and Molecular Physics Meeting 2015, 2015.

[15]

MEGER D, LARSEN M. Nuclear Magnetic Resonance Gyro for Inertial Navigation [J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5(2): 75-82.

[16]

SHKEL A. The Chip-scale Combinatorial Atomic Navigator [J]. GPS World, 2013, 24(8): 8-10.

[17]

李耐和, 张永红, 席欢. 美正在开发的 PNT 新技术及几点认识[J]. 卫星应用, 2015(12): 34-37.

LI Naihe, ZHANG Yonghong, XI Huan. The Exploitation of New PNT Technologies of Us and Some Understanding

[18]

杨元喜, 高为广. 基于多传感器观测信息抗差估计的自适应融合导航[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(10): 885-888.

YANG Yuanxi, GAO Weiguang. Integrated Navigation Based on Robust Estimation Outputs of Multi-sensor Measurements and Adaptive Weights of Dynamic Model Information[J]. Geomatics AND Information Science of Wuhan University, 2004, 29(10): 885-888.

[19]

YANG Y, ZHANG S. Adaptive Fitting of Systematic Errors in Navigation[J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(1-3): 43-49.

[20]

杨元喜, 崔先强. 动态定位有色噪声影响函数——以一阶 AR 模型为例[J]. 测绘学报, 2003, 32(1): 6-10.

YANG Yuanxi, CUI Xianqiang. Influence Functions of Colored Noises on Kinematic Positioning: Taking the AR Model of First Class as an Example[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(1): 6-10.

[21]

崔先强, 杨元喜, 高为广. 多种有色噪声自适应滤波算法的比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(8): 731-735.

CUI Xianqiang, YANG Yuanxi, GAO Weiguang. Comparison of Adaptive Filter Arithmetics in Controlling Influence of Colored Noises[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(8): 731-735.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2017-05-11

修回日期: 2017-07-07

第一作者简介: 杨元喜(1956—),男,博士,研究员,中国科学院院士,研究方向为动态大地测量数据与卫星导航数据处理。

First author: YANG Yuanxi (1956—), male, PhD, research fellow, academician of Chinese Academy of Sciences, majors in dynamic geodetic data and satellite navigation data processing.

E-mail: yuanxi_yang@163.com