

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.03.008

微型定位导航授时系统集成设计

王国栋,邢朝洋,杨亮,王振凯,孙丽艳

(北京航天控制仪器研究所,北京 100094)

摘要:针对定位导航与授时系统的微型化、一体化应用需求,提出了一种微型定位导航授时(Micro-PNT)系统集成方案,该方案是微小飞行器在GNSS拒止条件下可靠工作的有效解决手段。系统基于电路刚挠一体化工艺和器件空间布局优化技术,集成了MEMS惯性仪表、芯片级原子钟、处理器、电源芯片等功能器件,实现了系统的微型化、一体化。文中阐述了系统的集成架构和软件工作流程。通过系统样机的研制,验证了集成方案的可行性。通过分析系统样机的集成特点,指出其微型化存在的问题。最后,结合关键器件和三维微系统集成技术发展,给出了Micro-PNT微系统集成架构。

关键词:MEMS惯性仪表;芯片级原子钟;刚挠集成;三维集成

中图分类号:TN967.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):
文章编号:2095-8110(2019)03-0062-06



Integration Design of Micro Positioning Navigation and Timing System

WANG Guo-dong, XING Chao-yang, YANG Liang, WANG Zhen-kai, SUN Li-yan

(Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China)

Abstract: For the miniature and integration of positioning navigation and timing system, an integration solution of Micro-PNT system was proposed, which is an effective solution for micro air vehicle under GNSS denial environment. MEMS inertial instruments, chip-scale atomic clock, micro-processor, power chip and other chips were integrated based on rigid-flexible integration processing and Layout optimization technology. The integration frame and software flow were presented in detail. Designing was validated through system production. Problems of the integration for micromation were proposed through analyzing the integration form. Finally, microsystem integration frame of micro-PNT was proposed which was based on key parts and 3D microsystem integration processing in the future.

Key words: MEMS inertial instrument; Chip-scale atomic clock; Rigid-flexible integration; 3D integration

收稿日期:2018-07-21;修订日期:2018-09-03

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFB0501300,2016YFB0501303)

作者简介:王国栋(1982-),男,博士,高级工程师,主要从事导航与控制微系统技术研究、组合导航技术研究。

E-mail:wgdexpre@163.com

0 引言

时空信息是人们一切活动的基础,也是信息有效传递和交互的根本。宇宙是时间和空间的统一,宇宙是在不断运动和变化的。生活在宇宙中的人们开展一切活动,需要时时刻刻知道自己所在的位置。定位导航授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)技术是指用来获取对象时空信息的技术,是军事行动和社会经济活动共同的基础。PNT 系统有多种,包括全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)及其(天基、地基)增强系统、区域导航系统、长波授时系统、短波授时系统、网络授时系统、微波着陆系统、惯性导航系统、天文导航系统、重力/地磁/图像匹配导航系统以及多源组合导航系统等^[1-3]。Micro-PNT(Micro Positioning Navigation and Timing)作为一种微型化的 PNT 系统,成为 PNT 技术发展的一个重要方向。

Micro-PNT 是以微电子技术和微机电系统(MicroElectroMechanical System, MEMS)技术为基础,集成 MEMS 陀螺、MEMS 加速度计和芯片级原子钟等器件,满足多种平台导航、定位、授时等对小型化、低功耗、高可靠等方面的需求。Micro-PNT 目的在于降低各种平台对 GNSS 的依赖,为它们提供 GNSS 短时拒止条件下可靠的导航与授时能力。虽然 Micro-PNT 技术得到国内众多研究机构的关注和投入,但是仍然处于摸索和发展阶段,并且没有一款原型验证系统样机。基于目前的器件和集成工艺技术,提出了一种 Micro-PNT 样机设计方案,并开展了样机研制,为 Micro-PNT 的应用和发展奠定了基础。

1 国内外研究现状

美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)从 2002 年起陆续分别资助芯片级原子钟(Chip Scale Atomic Clock, CSAC)、集成化微型主原子钟技术(Integrated Micro Primary Atomic Clock Technology, IMPACT)、导航级集成微陀螺(Navigation Grade Integrated Micro Gyroscope, NGIMG)、信息控制的微型自主旋转平台(Information Tethered Micro Automated Rotary Stages, ITMARS)、微型惯性导航技术(Micro Inertial Navigation Technology, MINT)共 5 项研究。2010 年,正式启动微型定位导航授时技术(Micro-PNT)计划,在前

期研究部署的基础上新增了 5 个项目,如图 1 所示。

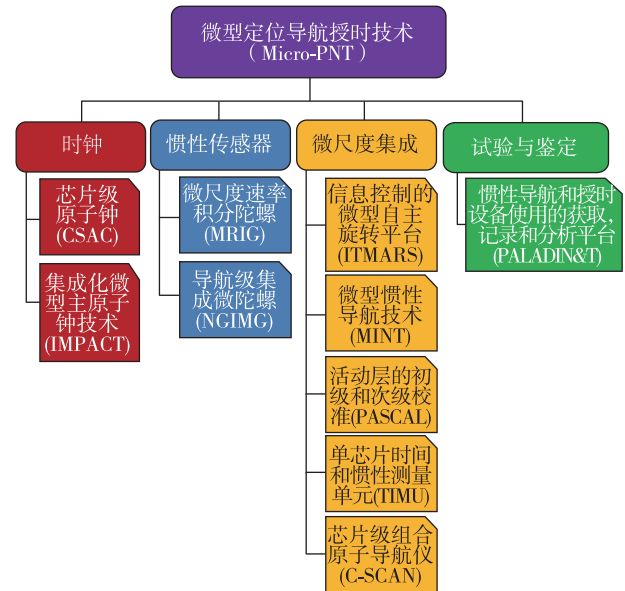


Fig. 1 American Micro-PNT research program

微尺度速率积分陀螺(Micro Scale Rate Integrating Gyroscope, MRIG)、活动层的初级和次级校准(Primary and Secondary Calibration on Active Layer, PASCAL)、单芯片时间和惯性测量单元(Timing and Inertial Measurement Unit, TIMU)、芯片级组合原子导航仪(Chip Scale Combinatorial Atomic Navigator, C-SCAN)以及惯性导航和授时设备使用的获取、记录和分析平台(Platform for Acquisition, Logging, and Analysis of Devices for Inertial Navigation & Timing, PALADIN&T)。到目前为止, DARPA 已投入近 5 亿美元实施 Micro-PNT 计划^[4-5]。

MEMS 陀螺和 MEMS 加速度计作为 Micro-PNT 的核心部件,目标是导航级(陀螺零偏稳定性 $0.01(^{\circ})/h$ 、加表的零偏稳定性 $100\mu g$)、芯片化。受限于技术发展水平,一直未能突破精度瓶颈,目前最具发展潜力的高精度芯片化陀螺是 MEMS 谐振环陀螺,精度已经实现优于 $0.1(^{\circ})/h$ ^[6]的水平。MEMS 加速度计成熟度相对较高,目前最具发展潜力的高精度芯片化加速度计是 MEMS 谐振式加速度计,精度达到优于 $50\mu g$ 的水平^[7]。高精度时钟的典型代表是美国迅腾公司的 SA. 45s 产品^[8-9],工作原子是 Cs、体积小于 $17cm^3$ 、秒稳优于 3×10^{-10} 、稳态功耗小于 $120mW$,是目前唯一一款产品化的芯片级相干布局数囚禁(Coherent Population Trapping, CPT)原子钟。

2018年7月,美国麻省理工学院的一则报道指出,该院研究团队开发出第一个芯片级分子钟,该型时钟在体积、成本方面相比CPT原子钟更具优势,且精度与微型原子钟相当^[10]。系统的微尺度集成是以器件的芯片化为基础的,受限于原子钟的体积和MEMS仪表的精度水平,DARPA构想的微尺度集成计划未能获得实质性进展。

中国在2013年启动了Micro-PNT的技术论证,“十三五”期间,在有关部门的大力支持下,部分先导类项目如器件技术、集成技术得到发展。但是,受器件技术^[11-13]和集成技术的限制,Micro-PNT一直处于发展之中。国内的MEMS陀螺仪的精度达到 $5(^{\circ})/h$ 水平,MEMS加速度计的精度为 $100\mu g$ 的水平。高精度时钟方面,主要的研究单位包括北京大学、中科院物理与数学研究所、成都天奥等,精度水平与国外相当,但是在体积、重量、功耗方面,整体上与国外存在一定差距。在系统集成与应用技术研究方面,国内的清华大学、北京自动化控制设备研究所、国防科技大学、华东光电集成器件研究所等单位,开展了单项技术研究,结合卫星导航接收机,发挥互补优势,开展前期验证工作。北京航天控制仪器研究所基于惯性技术研究的优势,结合原子钟的工作特点,率先开展了Micro-PNT系统集成样机的研制工作,并完成了首台样机的集成开发。

2 Micro-PNT 集成设计

Micro-PNT是建立在芯片级、高精度惯性仪表和时钟基础之上的,是惯性导航技术、时钟技术和微系统集成技术相结合的产物,是信息化、网络化、协同一体化发展的必然趋势。CPT原子钟是目前尺寸最小的原子钟,但是由于其光学结构腔体体积较大,因此CPT原子钟未能实现芯片化。对于系统集成而言,时钟芯片化成为系统集成的瓶颈。由于受仪表和时钟技术的限制,Micro-PNT的系统集成需要经历2个阶段。第一阶段:基于封装后的MEMS惯性仪表、高精度时钟和传统的PCB集成技术,进行M-PNT的一体化集成;第二阶段:基于裸芯级MEMS惯性仪表和高精度时钟以及三维硅通孔(Through-Silicon Vias,TSV)集成工艺,进行M-PNT的一体化集成。下面重点介绍了第一种集成方案以及研制的样机。

2.1 系统硬件集成设计

Micro-PNT系统是以芯片级的MEMS陀螺

仪、MEMS加速度计、CPT原子钟为基础的。系统的工作原理如图2所示,Micro-PNT是GNSS的有益补充,在GNSS正常情况下,系统通过惯性/GNSS的组合导航估计惯性导航的误差,并实时修正该误差;同时利用GNSS提供的协调世界时(Coordinated Universal Time,UTC)信息修正CPT原子钟的时标信息。在GNSS拒止条件下,系统工作依赖于纯惯性导航和CPT原子钟,提供短时高精度的导航信息和时钟信息。

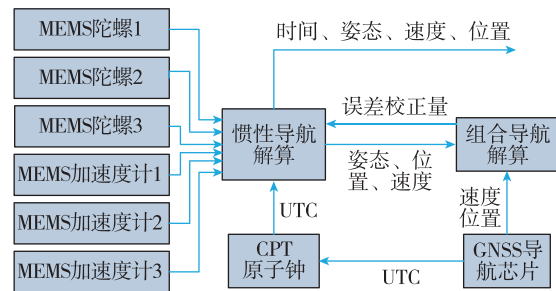


图2 Micro-PNT系统的工作原理

Fig. 2 Working principle of Micro-PNT

根据仪表的特点,系统采用刚挠板一体设计,集成到一块刚挠结构的电路板上,实现一体化制造。在制造完成之后,通过挠性弯曲安装于正交结构面上,实现MEMS惯性仪表的三轴正交。系统的构成如图3所示,包含底面、侧面1、侧面2、顶面共计4个面。4个安装面之间通过挠性带连接实现信号的交互,挠性带的弯曲半径 $\geq 3mm$ 。刚挠结合板组件的安装示意图如图4所示。

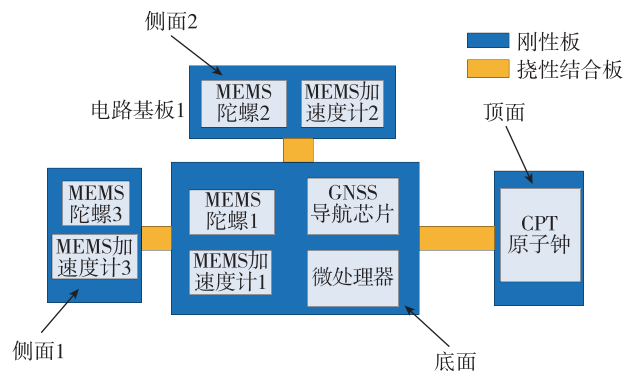


图3 系统的构成

Fig. 3 Composition of the system

其中,微处理器部分由DSP+FPGA及外围电路实现。微处理器接收来自MEMS惯性仪表的信息和接收机的信息,完成捷联解算、信息融合和组

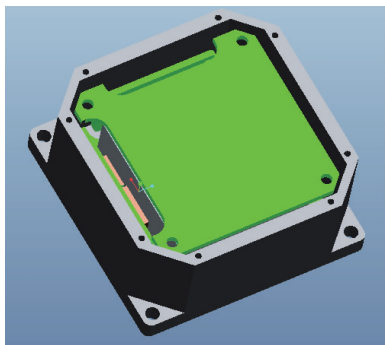


图 4 刚挠结合板组件的安装示意图

Fig. 4 Layout scheme of Micro-PNT rigid-flexible integration

合导航解算,输出高精度的位置、速度、姿态和时钟信息。同时,GNSS输出的UTC、秒脉冲(Pulse Per Second, PPS)、位置等信息,可以实现CPT原子钟、惯性导航的初始化。

系统包含 2 个时钟源,分别是 CPT 原子钟的 10MHz 频率输出和有源晶振的 18.432MHz 频率输出。其中 10MHz 频率是系统主时钟,并实现授时功能;有源晶振的输出通过分频供串口通信使用。时钟电路如图 5 所示。

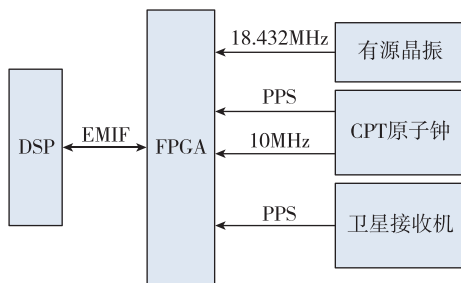


图 5 时钟电路框图

Fig. 5 Block diagram of time clock circuit

系统上电后,CPT 原子钟通过卫星接收机的 PPS 输出信号进行频率驯服,并通过串口将授时信息和状态信息发送至数字信号处理器(Digital Signal Processing,DSP)中。

2.2 系统软件设计

Micro-PNT 系统作为飞行器、车载终端等载体的导航和授时单元,其主要功能是完成卫星导航信号拒止条件下的导航和授时功能。在卫星导航信号正常时,可以修正惯性导航和 CPT 原子钟的累积误差^[14]。因此,系统工作在两种状态下:一是组合导航和授时状态;一是惯性导航和守时状态。

系统的软件工作流程如图6所示。首先使系统

上电复位,向各个模块的控制寄存器写入控制命令字,对硬件的各个模块进行初始化设置,包括惯性导航解算的初始导航信息赋值和 CPT 原子钟的时间同步。初始化之后,DSP 发送开始运行信号,启动 DSP 计时器和定时中断,DSP 的定时中断模块在计数器进行 5ms 计数后就会产生一个内部中断信号,使程序进入导航解算部分,判断 GNSS 导航信息是否可用。如果可用,利用卫星导航解算的定位信息和时间信息进行组合导航解算,以修正惯性导航的累积误差;同时利用卫星导航的 PPS 和 UTC,对时钟信息进行校正,以消除时钟的误差。如果不可用,只进行惯导解算和计时。最后,系统输出高精度的导航和时间信息。

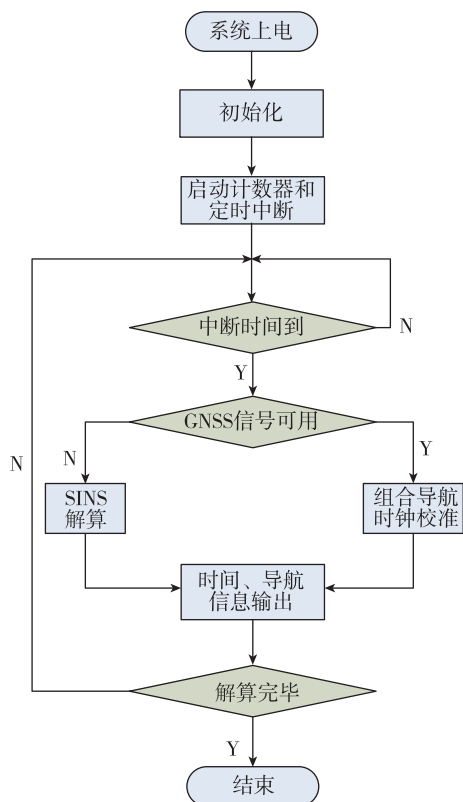


图 6 系统的软件工作流程

Fig. 6 Work flow of system

2.3 Micro-PNT 集成样机

为了验证系统集成的方案,通过选择合适的 MEMS 陀螺、MEMS 加速度计、CPT 原子钟,基于刚挠一体化电路设计以及相应的结构设计,完成了系统样机的研制。Micro-PNT 集成的样机如图 7 所示,系统的体积为 65mm×65mm×30mm。

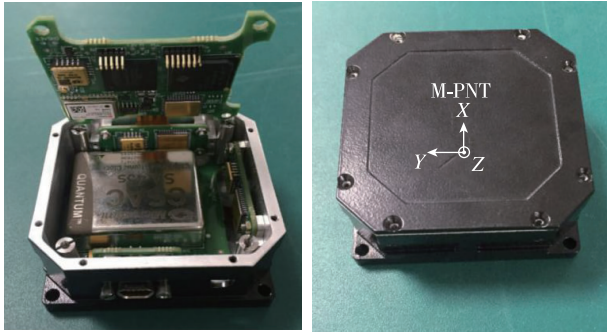


图7 Micro-PNT 样机

Fig. 7 Prototype of Micro-PNT

通过集成的样机可以看出,系统的体积、重量比较大,主要原因有以下几个方面:1)MEMS陀螺仪、MEMS加速度计、处理器等器件,均采用已封装器件,封装相比内部芯片,面积大大增加;2)CPT原子钟体积占比较大,是系统微型化的重要瓶颈;3)系统集成采用传统的PCB板平面集成工艺和刚挠一体化集成工艺,不能有效地利用空间资源。因此,随着器件技术的发展和成熟,为了实现Micro-PNT系统的进一步微型化,需要采用三维微系统集成工艺技术。

3 三维 TSV 集成设计

随着高精度时钟技术的发展和三维集成封装工艺技术的成熟,Micro-PNT系统将进一步实现微型化、低功耗和低成本。基于TSV、IPD、FC等工艺^[15-16],可以实现Micro-PNT的微系统集成。MEMS惯性系统的三轴正交集成决定了系统需要3个安装面,每个安装面可以分别进行多芯片立体集成形成一个模块,之后3个模块进行三维组装,实现系统的三维立体集成。图8给出了一个安装面TSV集成的示意图。

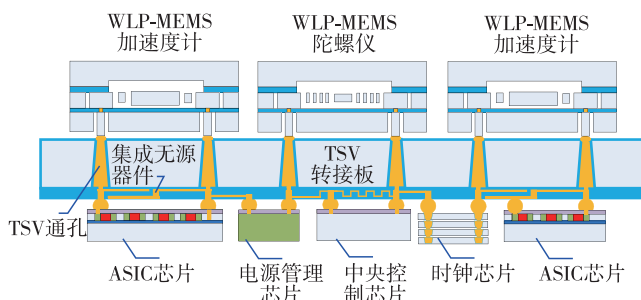


图8 多芯片 TSV 立体集成

Fig. 8 3D TSV integration of multi-chips

Micro-PNT的三维集成分为2个层次进行,第一层次是多芯片的TSV集成。每个安装面按照图8所示的方式进行TSV集成,每个芯片上设计有多个用于垂直连接的金属突出或者凹槽,从而实现了多个芯片直接垂直连接,形成相对独立的模块;第二个层次是模块级立体集成技术。模块级立体集成是通过设计微型立方体等机械结构,将通过采用上述集成方式完成集成的模块进行再一次集成,微型机械结构的每一个面都可以集成一个模块,实现系统的一体化集成,集成方式如图9所示。

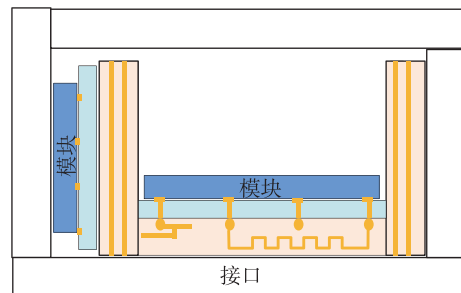


图9 模块级的立体集成

Fig. 9 3D integration of modulations

4 结论

Micro-PNT系统技术是针对GNSS拒止条件下微小型无人机、制导弹药、单兵、车辆等平台的信息化、网络化时空信息感知应用需求,采用微系统集成工艺集成的一种导航级、微小型时空信息感知系统。通过分析MEMS陀螺仪、MEMS加速度计、CPT原子钟的国内外研究现状,可以得出以下结论:

1)国内的MEMS陀螺仪和加速度计相比国外精度水平相差至少1个数量级,相比Micro-PNT的导航级应用还有较大差距;

2)高精度的CPT原子钟能够满足多种平台的时频应用需求,但是体积仍然是制约Micro-PNT系统微型化的因素;

3)提出了一种基于现有的MEMS陀螺仪、加速度计、CPT原子钟的集成方案,并率先在国内完成了样机研制;

4)基于芯片级器件,采用微系统集成工艺,提出了一种Micro-PNT系统集成方案,能够实现系统的高密度、微尺度集成。

参考文献

- [1] 杨元喜, 李晓燕. 微 PNT 与综合 PNT[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1249-1254.
Yang Yuanxi, Li Xiaoyan. Micro-PNT and comprehensive PNT[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1249-1254(in Chinese).
- [2] 张风国, 张红波. 美国 PNT 体系结构研究方法[J]. 全球定位系统, 2016, 41(1): 24-31.
Zhang Fengguo, Zhang Hongbo. Study method of US PNT architecture[J]. GNSS World of China, 2016, 41(1): 24-31(in Chinese).
- [3] 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.
You Zheng, Ma Lin. Construction of a micro positioning navigation and timing system: a change of the pattern of PNT service[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(12): 116-119(in Chinese).
- [4] 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): 81-87.
Wen Suli, Zhang Guoqing. The technology progress of PNT in GPS limited conditions[J]. Tactical Missile Technology, 2014(6): 81-87(in Chinese).
- [5] 李薇, 席翔, 吴宇列. 定位导航授时微系统技术[J]. 国防科技, 2015, 36(5): 37-41.
Li Wei, Xi Xiang, Wu Yulie. The introduction for micro-system technology for positioning, navigation and timing[J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(5): 37-41(in Chinese).
- [6] 薛连莉, 陈少春, 陈效真. 2017 年国外惯性技术发展与回顾[J]. 导航与控制, 2017, 17(2): 1-9.
Xue Lianli, Chen Shaochun, Chen Xiaozhen. Development and review of foreign inertial technology in 2017[J]. Navigation and Control, 2017, 17(2): 1-9(in Chinese).
- [7] 齐广峰, 吕军锋. MEMS 惯性技术的发展及应用[J]. 电子设计工程, 2015, 23(1): 87-92.
Qi Guangfeng, Lu Junfeng. Evolution and application of MEMS inertial technology[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(1): 87-92(in Chinese).
- [8] 王淑华. 国外 CPT CSAC 技术发展现状[J]. 微纳电子技术, 2016, 53(3): 137-145.
Wang Shuhua. Development status of CPT CSAC in foreign countries[J]. Micronanoelectronic Technology, 2016, 53(3): 137-145(in Chinese).
- [9] Ramki Ramakrishnan. Very small atomicclocks enable scaling-down of GPS[J]. Electronic Engineering & Product World, 2017(8): 26-29.
- [10] Rob Matheson. [Http://news.mit.edu/2018/molecular-clocks-improve-smartphone-navigation-performance0713](http://news.mit.edu/2018/molecular-clocks-improve-smartphone-navigation-performance0713)[EB/OL]. [2018-07-13]. MIT News Office.
- [11] 高杨, 雷强, 赵俊武, 等. 微机械谐振式加速度计的研究现状及发展趋势[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(8): 1-14.
Gao Yang, Lei Qiang, Zhao Junwu, et al. Research status and development trend of micro-mechanical resonance accelerometer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(8): 1-14(in Chinese).
- [12] 王浩, 叶泽刚, 张奇荣, 等. MEMS 环形谐振陀螺闭环系统建模、仿真与参数分析[J]. 导航与控制, 2017, 16(6): 25-32.
Wang Hao, Ye Zegang, Zhang Qirong, et al. System modeling, simulation and parameter analysis of MEMS vibrating ring gyroscope[J]. Navigation and Control, 2017, 16(6): 25-32(in Chinese).
- [13] 杜少林, 陈鹏光, 陈书钊, 等. 高成本和低成本 MEMS 加速度计性能比较研究[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(4): 48-50.
Du Shaolin, Chen Pengguang, Chen Shuzhao, et al. Research on performance comparison of high cost and low cost MEMS accelerometers[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(4): 48-50(in Chinese).
- [14] 石拓, 陈家斌, 田晓春, 等. 微惯性/卫星组合导航系统算法研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(6): 26-32.
Shi Tuo, Chen Jiabin, Tian Xiaochun, et al. Algorithm research on MINS/GNSS integrated navigation system[J]. Navigation Positioning and Timing, 2016, 3(6): 26-32(in Chinese).
- [15] 赵正平. 微系统三维集成技术的新发展[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(1): 1-10.
Zhao Zhengping. New progress of the micro system three-dimensional integration technology[J]. Micronanoelectronic Technology, 2017, 54(1): 1-10(in Chinese).
- [16] 代刚, 张健. 集成微系统概念和内涵的形成及其架构技术[J]. 微电子学, 2016, 46(1): 101-105.
Dai Gang, Zhang Jian. Concept and architecture technology of integrated microsystems[J]. Microelectronics, 2016, 46(1): 101-105(in Chinese).